



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**“Modelo de simulación dinámica aplicado al
aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza,
Manabí - Ecuador”**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Francisco Javier VELÁSQUEZ INTRIAGO

ASESOR

Dr. Francisco Alejandro ALCÁNTARA BOZA

Lima, Perú

2020



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Velásquez, F. (2020). *Modelo de simulación dinámica aplicado al aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza, Manabí - Ecuador*. Tesis para optar grado de Doctor en Ciencias Ambientales. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS

CODIGO ORCID DEL AUTOR:

CODIGO ORCID DEL ASESOR: 0000-0001-9127-4450

DNI: 1309483913

GRUPO DE INVESTIGACIÓN: NINGUNO

INSTITUCIÓN QUE FINANCIA PARCIAL O TOTALMENTE LA INVESTIGACIÓN: INVERSIÓN PROPIA

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DONDE SE DESARROLLÓ LA INVESTIGACIÓN. DEBE INCLUIR LOCALIDADES Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS

COORDENADAS UTM 602875E 9901672N

ZONA: 17 M

DATUM: WGS84

APROXIMADAMENTE A 12 KILÓMETROS DE LA CIUDAD DE CALCETA.

CANTÓN BOLÍVAR – PROVINCIA DE MANABÍ - ECUADOR

AÑO O RANGO DE AÑOS QUE LA INVESTIGACIÓN ABARCÓ:

ABRIL 2014 – ENERO 2020



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos-Lima, a los veintitrés días del mes de enero del 2020, siendo las 15:00 horas, se reúnen los suscritos miembros del JURADO EXAMINADOR DE TESIS, nombrado mediante Dictamen N.º 924/UPG-FIGMMG/2019 del 20 de diciembre del 2019, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TITULO

«MODELO DE SIMULACIÓN DINÁMICA APLICADO AL APROVECHAMIENTO EFICIENTE DEL EMBALSE LA ESPERANZA, MANABÍ - ECUADOR»

Que, presenta el Mg. **FRANCISCO JAVIER VELÁSQUEZ INTRIAGO**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**.

El secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N.º 07611-FIGMMG-2014 del 23 de octubre del 2014, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento de los Estudios de Maestría y Doctorado».

Luego de la Sustentación de la Tesis, los miembros del Jurado Examinador procedieron a aplicar la escala descrita en el Art. 61 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

..... *Muy Buena (18)*

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES** al Mg. **FRANCISCO JAVIER VELÁSQUEZ INTRIAGO**.

Siendo las 16:00 horas, se dio por concluido al acto académico

DR. OSCAR RAFAEL TINOCO GÓMEZ
Presidente

DR. CARLOS AUGUSTO ANTONIO CARBONEL HUAMÁN
Secretario

DRA. VERÓNICA DAYANA ESPINEL PINO
Miembro

DR. FRANCISCO ALEJANDRO ALCÁNTARA BOZA
Asesor

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico con todo mi cariño:

A Dios, por ser la llama total de amor y misericordia.

A mis padres Elizabeth y Fredy, por ser ejemplo de amor y virtud infinita.

A mis hermanos Isabel, Mariela, Adrián y Juan, por la fe depositada en mí.

A mi esposa Liliam, por el incondicional amor que me profesa.

A mis hijos Leidy Laura y Leandro, así como a mis sobrinas: Adriana, Cinthya, Galilea, Victoria, Stephanie, Michelle, Marianita, Luana y Dahyli, mis sobrinos: Pierre, Farid, Antonio (+), Lucciano, Stéfano y Alessandro por el amor y ternura que me irradian.

A mis suegros Leyo y Marianita; a mis cuñadas: Lourdes, Cecilia, Lilibeth y Silvia; a mis cuñados: Mariano, Lucio y Luis por el aprecio y consideración.

A mis abuelos Eudoro (+), Ovidio (+), Graciela (+) y Gladys por ser ejemplo de vida a su larga descendencia.

A mis tías: Dolores, Teresa, Anita, Yolanda, Lupe y Zonia; a mis tíos: Oriol, Ramón, Germán, Ángel, Auster, Alberto, Byron, Luis, Edgar y Gustavo, por su bondad y querencia.

A mis primos, familiares políticos, compadres y amigos, por los momentos vividos.

A mis compañeros docentes, estudiantes e ingenieros ambientales de la carrera de Ingeniería Ambiental de la ESPAM MFL por ser parte del desarrollo científico ambiental desde cada una de sus posiciones.

A todos ellos les dedico la presente obra doctoral, como fruto del esfuerzo, sacrificio, perseverancia, disciplina, paciencia y tiempo invertido.

Francisco Velásquez I.

AGRADECIMIENTO

Mi reconocimiento imperecedero a todos los maestros de Posgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por ser la fuente de motivación e inspiración; que con sus conocimientos aportaron significativamente al desarrollo y culminación de esta investigación, en especial al Dr. Jesús Ángel Chávez Machado (+) y Dra. Margarita Ysabel Pajares Flores.

Al Dr. Carlos Francisco Cabrera Carranza: Director de la Unidad de Posgrado Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica.

Al Dr. Oscar Rafael Tinoco Gómez: Jurado Presidente.

Al Dr. Carlos Augusto Antonio Carbonel Huaman: Jurado Secretario.

A la Dra. Verónica Dayana Espinel Pino: Jurado Miembro.

Al Dr. Francisco Alejandro Alcántara Boza: Jurado Asesor.

Al Dr. Eric Cabrera Estupiñán: Co-asesor.

A todos ellos millón gracias por su valiosa colaboración, orientación, esmero y tiempo invertido.

Dejo constancia de mi sentimiento de gratitud y estima a las autoridades de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Perú), así como también a los de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López (Ecuador), por las facilidades brindadas.

A mis compañeros del Doctorado en Ciencias Ambientales, a los que recordaré por los momentos compartidos.

Al ing. Abel Chávez técnico de la represa La Esperanza, al ing. Francisco Pico técnico de operación y mantenimiento de la Empresa Pública del Agua (EPA) en Manabí, al ing. Sergio Mera ex-técnico de la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), por la apertura y apoyo informativo.

A cada una de las personas y amigos que han sido parte del universo contiguo, testigos fehacientes de innumerables retos y desafíos en el caminar diario de la existencia, a todos ustedes ¡¡¡ Mis sinceros agradecimientos !!!

El Autor

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE GENERAL	v
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Situación problemática	1
1.2. Formulación del Problema	3
1.2.1. Problema General.....	3
1.2.2. Problemas Específicos	3
1.3. Justificación Teórica	3
1.4. Justificación Práctica	4
1.5. Objetivos	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Marco filosófico o epistemológico de la investigación	7
2.2. Antecedentes de investigación	9
2.2.1. Antecedente histórico	9
2.2.2. Antecedente del arte en cuestión.....	10
2.3. Bases teóricas	11
2.3.1. Teoría General de Sistemas (TGS)	12
2.3.1.1. Objetivos Originales de la Teoría General de Sistemas	12
2.3.1.2. Clasificaciones Básicas de Sistemas Generales.....	12
2.3.2. Teoría de la Simulación	14
2.3.2.1. Etapas de una simulación.....	14
2.3.2.2. Ventajas de la Simulación.....	16
2.3.2.3. Simulación Computarizada	16
2.4. Bases Conceptuales.....	17
2.4.1. Modelo de Simulación Dinámica.....	17
2.4.2. Características Fisiográficas.....	17
2.4.2.1. Embalse	18
2.4.2.2. Presa	18
2.4.2.3. Cuenca Hidrográfica	19
2.4.2.4. Clasificación de una cuenca	19
2.4.2.5. Características de las cuencas hídricas.....	20

2.4.2.6.	Área de la cuenca (A)	20
2.4.2.7.	Perímetro de la cuenca (P)	20
2.4.2.8.	Coeficiente de Compacidad o índice de Gravelius (Kc)	21
2.4.2.9.	Longitud de cuenca (L)	21
2.4.2.10.	Factor de forma (Kf).....	22
2.4.2.11.	Ciclo hidrológico	22
2.4.2.12.	Balance hídrico.....	23
2.4.2.13.	Precipitación	25
2.4.2.14.	Precipitación media de un área: Método de las isoyetas	25
2.4.2.15.	Evaporación.....	26
2.4.2.16.	Evapotranspiración	26
2.4.2.17.	Caudales fluviales.....	28
2.4.2.18.	Escorrentías	28
2.4.2.19.	Textura de suelo	28
2.4.2.20.	Sedimentos.....	29
2.4.2.21.	Infiltración y percolación	30
2.4.3.	Eventos meteorológicos extremos (sequías – lluvias torrenciales).....	30
2.4.3.1.	Sequías	30
2.4.3.2.	Lluvias torrenciales	31
2.4.4.	Inundaciones	31
2.4.5.	Proyecciones Pluviales.....	31
2.4.5.1.	Cambio Climático Global	31
2.4.5.2.	Cambio Climático en Ecuador	33
2.4.5.3.	Escenarios de Emisiones de Cambio Climático	33
2.4.5.4.	Modelos Climáticos Globales “GCMs”	34
2.4.6.	Curvas Guías de Operación	36
2.4.6.1.	Parametrización, Simulación y Optimización	36
2.4.6.2.	Curva Guía para Control de Crecidas y Volumen de Espera	37
2.4.6.3.	Modelación matemática en la operación de embalses.....	38
2.4.6.4.	Gráfico de despacho.....	38
2.4.6.5.	Partes del gráfico de despacho.....	38
2.4.6.6.	Método Logarítmico Pearson Tipo III:.....	39
2.4.6.7.	Parámetros estadísticos para el cálculo de la distribución empírica y coeficiente modular “k”	40
2.4.6.8.	Regulación anual	41
2.4.6.9.	Análisis de sensibilidad.....	44
2.4.6.10.	Validación del modelo.....	44

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....48

3.1.	Tipo y Diseño de Investigación	48
3.2.	Flujograma metodológico de la investigación.....	49
3.2.1.	Descripción general de los métodos utilizados	52
3.3.	Unidad de Análisis	58
3.4.	Técnicas de Recolección de Datos	59
3.5.	Análisis e Interpretación de la Información	59
3.6.	Gráfico de despacho.....	60
3.7.	Procedimientos realizados.....	63

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
4.1. Presentación, análisis e interpretación de resultados	66
4.1.1. Características superficiales de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.	66
4.1.1.1. Características superficiales	66
4.1.1.2. Almacenamiento actual del embalse	68
4.1.1.3. Análisis de áreas de aporte "Estación Calceta - Presa La Esperanza"	71
4.1.2. Elaboración de las proyecciones pluviales del área en estudio a través de los datos históricos de las estaciones meteorológicas.	72
4.1.2.1. Data histórica de precipitaciones y elaboración de Isoyetas	72
4.1.2.2. Proyección pluviométrica aplicando modelo climático HadCM3	73
4.1.2.3. Proyecciones térmicas del área de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.	79
4.1.2.4. Cálculo de Evapotranspiración	80
4.1.2.5. Estimación de recargar referencial	81
4.1.3. Extracción de curvas guías de operación a través de un balance digital en la regulación del volumen del embalse La Esperanza.	83
4.1.3.1. Análisis de niveles de almacenamiento	83
4.1.3.2. Análisis de caudales de vertido.	85
4.1.3.3. Información de diseños y sistemas de la represa	85
4.1.3.4. Cálculo de avenidas máximas	86
4.1.3.5. Balance hídrico	88
4.1.3.6. Capacidades del embalse	89
4.1.3.7. Regulación de embalse La Esperanza en condiciones media, mínima y máxima precipitación	90
4.1.3.8. Elaboración de gráfico de despacho	99
4.2. Discusión	104
4.3. Prueba de hipótesis	107
CONCLUSIONES	108
RECOMENDACIONES	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
ANEXOS	122

LISTA DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Clasificación de embalse según su tamaño.....</i>	<i>18</i>
<i>Cuadro 2. Descripción de cuencas de acuerdo a su superficie.....</i>	<i>20</i>
<i>Cuadro 3. Parámetros del Índice de Compacidad de una cuenca hidrográfica</i>	<i>21</i>
<i>Cuadro 4. Distribución de Agua en el Planeta.....</i>	<i>24</i>
<i>Cuadro 5. Balance Global Anual del Agua.....</i>	<i>24</i>
<i>Cuadro 6. Propiedades físicas del suelo en la cuenca aportante del embalse La Esperanza.....</i>	<i>29</i>
<i>Cuadro 7. Tabla de módulos de K de la distribución Pearson tipo III</i>	<i>40</i>
<i>Cuadro 8. Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación</i>	<i>47</i>
<i>Cuadro 9. Ecuaciones de complementación de datos pluviométricos utilizadas</i>	<i>54</i>
<i>Cuadro 10. Regulación de embalse</i>	<i>58</i>
<i>Cuadro 11. Geometría superficial de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.....</i>	<i>66</i>
<i>Cuadro 12. Coordenada del centroide de la cuenca aportante al embalse La Esperanza</i>	<i>67</i>
<i>Cuadro 13. Datos de geomorfológicos del área de estudio.....</i>	<i>67</i>
<i>Cuadro 14. Datos de elevaciones del área de estudio</i>	<i>68</i>
<i>Cuadro 15. Volumen y superficie del embalse La Esperanza año 2018.....</i>	<i>69</i>
<i>Cuadro 16. Coeficiente de relación (Kr) en áreas aportantes.....</i>	<i>71</i>
<i>Cuadro 17. Volúmenes y caudales medios mensuales promedio histórico "Estación Calceta - Presa La Esperanza".....</i>	<i>72</i>
<i>Cuadro 18. Simplificado general de precipitaciones medias mensuales del periodo 1980 – 2017, para la cuenca aportante al embalse La Esperanza.....</i>	<i>73</i>
<i>Cuadro 19. Promedio de los coeficientes de anomalía del modelo HadCM3 para proyección pluvial.....</i>	<i>74</i>
<i>Cuadro 20. Ecuaciones lineales para proyecciones pluviométricas</i>	<i>76</i>
<i>Cuadro 21. Relación precipitación promedio-caudal medio histórico</i>	<i>77</i>
<i>Cuadro 22. Proyección de precipitación y caudal</i>	<i>78</i>
<i>Cuadro 23. Proyección térmica del modelo HADCM3.....</i>	<i>79</i>
<i>Cuadro 24. Promedio de temperaturas, modelo HadCM3 para proyección térmica</i>	<i>79</i>
<i>Cuadro 25. Ecuaciones lineales para proyecciones térmicas</i>	<i>80</i>
<i>Cuadro 26. Compendio del cálculo de evapotranspiración</i>	<i>80</i>
<i>Cuadro 27. Estimación de la recarga referencial media del embalse, año 2018.....</i>	<i>81</i>
<i>Cuadro 28. Estimación de recarga referencial media del embalse, año 2100.....</i>	<i>82</i>
<i>Cuadro 29. Volumen estimado de recarga media referencial del embalse La Esperanza</i>	<i>82</i>
<i>Cuadro 30. Caudales históricos de vertidos al río</i>	<i>85</i>
<i>Cuadro 31. Datos de diseño y construcción de la represa</i>	<i>85</i>
<i>Cuadro 32. Sistemas acoplados al embalse La Esperanza</i>	<i>86</i>
<i>Cuadro 33. Datos del cálculo para hidrograma unitario efectivo</i>	<i>87</i>

<i>Cuadro 34. Coordenadas del hidrograma unitario efectivo</i>	<i>87</i>
<i>Cuadro 35. Regulación del embalse La Esperanza en condiciones de media precipitación, año 2018.....</i>	<i>91</i>
<i>Cuadro 36. Regulación del embalse La Esperanza en condiciones de mínima precipitación, año 2018.....</i>	<i>92</i>
<i>Cuadro 37. Regulación del embalse La Esperanza en condiciones de máxima precipitación, año 2018</i>	<i>93</i>
<i>Cuadro 38. Análisis de avenidas máximas, periodo 1987- 2019.....</i>	<i>96</i>
<i>Cuadro 39. Caudal soportable promedio del río Carrizal, aguas abajo del embalse La Esperanza en el periodo húmedo, que evita inundaciones en el área de influencia.....</i>	<i>98</i>
<i>Cuadro 40. Análisis de volumen de resguardo de la represa La Esperanza</i>	<i>98</i>
<i>Cuadro 41. Resumen de cota – volumen de resguardo</i>	<i>99</i>
<i>Cuadro 42. Distribución en porcentajes</i>	<i>99</i>
<i>Cuadro 43. Déficit relativo de consumo</i>	<i>99</i>
<i>Cuadro 44. Relación entre α y β_u</i>	<i>100</i>
<i>Cuadro 45. Entrega garantizada</i>	<i>100</i>
<i>Cuadro 46. Ecurrimiento de cálculo para el período húmedo.....</i>	<i>100</i>
<i>Cuadro 47. Entrega de escurrimientos, demanda actual y déficit.....</i>	<i>100</i>
<i>Cuadro 48. Distribución mensual del escurrimiento de cálculo</i>	<i>101</i>
<i>Cuadro 49. Rama de llenado</i>	<i>101</i>
<i>Cuadro 50. Rama de vaciado</i>	<i>102</i>
<i>Cuadro 51. Coordenadas del gráfico de despacho y curva guía en hm3 ...</i>	<i>102</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Áreas susceptibles a inundación.....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Esquema general del proceso de modelado científico.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3. Representación esquemática de una cuenca hidrográfica</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4. Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global. Fuente: Chow et al., 1964.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5. Modelo de Balance Hídrico (Precipitación, Evaporación, Escorrentía e Infiltración). Fuente: Témez, 1977</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6. Triangulo textural según el tamaño de las partículas (USDA)</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7. Variación de la temperatura en superficie global. Fuente: IPCC, 2013.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 8. Variación de la precipitación anual sobre la superficie terrestre mundial. Representación gráfica de la variación de las precipitaciones, entre 1901-2010 y 1951-2010. Fuente: IPCC, 2013.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9. Emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial para escenarios SRES. Emisiones anuales totales de CO2 provenientes de todas las fuentes (energía, industria y cambio de uso de las tierras) entre 1990 y 2100 (en gigatoneladas de carbono (GtC/año). Fuente: IPCC, 2002</i>	<i>34</i>

Figura 10. Evolución de los modelos climáticos globales e ilustración por cilindros de crecimiento. Fuente: IPCC, 2013.....	35
Figura 11. Ejemplo de curva guía para control de crecidas con volumen de espera variable durante el año. Fuente: Adaptado de Chen, 2007	36
Figura 12. Ejemplo de gráfico de despacho. Fuente: Cabrera, 2019	39
Figura 13. Ubicación del área de estudio.....	59
Figura 14. Volumen y Superficie del Embalse La Esperanza.	70
Figura 15. Curva caudal, volumen – meses del histórico promedio mensual “Estación Calceta - Presa La Esperanza”.....	72
Figura 16. Relación precipitación vs caudales promedios históricos.	77
Figura 17. Precipitación media observada vs Proyección 2018	81
Figura 18. Precipitación media observada vs Proyección 2100	82
Figura 19. Niveles de cotas de funcionamiento de embalse (1/1996 – 6/2001).....	83
Figura 20. Niveles de cotas de funcionamiento de embalse (7/2001 – 12/2006).....	83
Figura 21. Niveles de cotas de funcionamiento de embalse (7/2007 – 12/2012).....	84
Figura 22. Niveles de cotas de funcionamiento de embalse (7/2012 – 12/2017).....	84
Figura 23. Curvas guías en análisis histórico previo (2000 - 2017).....	84
Figura 24. Hidrograma efectivo con identificación del caudal máximo	88
Figura 25. Esquema de balance hídrico del área de estudio.....	88
Figura 26. Diagrama de flujo de los sistemas conectados al embalse La Esperanza.....	89
Figura 27. Curva de capacidad del embalse	90
Figura 28. Curva guía de operación en condiciones medias, año 2018	95
Figura 29. Curva guía de operación en condiciones máximas, año 2018	95
Figura 30. Curva guía de operación en condiciones mínimas, año 2018	96
Figura 31. Gráfico de despacho del embalse	103
Figura 32. Diagrama de sensibilidad.....	107

RESUMEN

En la presente investigación se conceptúo las influencias primordiales de las variables meteorológicas y cuantificó las variaciones del embalse La Esperanza como consecuencia del cambio climático, que incide en la variación de la temperatura y precipitación, como problemática en el control del volumen de almacenamiento para el organismo encargado de su gestión.

El desarrollo de esta compilación se la ejecutó en tres fases, en la primera se determinó las características superficiales (morfográficas y fisiográfica) de la cuenca aportante al embalse La Esperanza mediante los sistemas de información geográfica “SIG” y batimetría ecosonográfica, obteniendo la ecuación polinómica en la determinación del volumen en función de su cota, en la segunda fase se aplicó estadística descriptiva e inferencial para visualizar holísticamente la data hidrológica histórica y elaborar ecuaciones matemáticas de proyecciones pluviales mensuales del área en estudio aplicando los coeficientes de anomalías del cuarto informe del IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático), basados en las condiciones climáticas proyectadas a futuro, que influyen en las precipitaciones y evapotranspiración de la región en uso de los datos históricos de las estaciones meteorológicas, finalmente en la tercera fase se dedujo la ecuación precipitación-caudal medio mensual agrupando todas las ecuaciones matemáticas en un balance hídrico digital, que permitió visualizar las variaciones del embalse, estimando el comportamiento volumétrico conjuntamente con las entradas y salidas de caudales, además de las restricciones de operación de la presa, proponiendo las secuencias de las curvas guías de operación en base a los históricos mínimos, medios y máximos por medio de la simulación de múltiples escenarios.

Palabras clave: Características fisiográficas, proyecciones pluviales, curva guía de operación.

ABSTRACT

In the present investigation, the main influences of the meteorological variables were conceptualized and quantified the variations of the La Esperanza reservoir as a consequence of climate change, which affects the variation of temperature and precipitation, as a problem in the control of the volume of storage for the organism in charge of its management.

The development of this compilation was carried out in three phases, in the first phase the morphological and physiographic characteristics of the basin contributing to the La Esperanza reservoir were determined through the geographic information systems "GIS" and the ecosonographic bathymetry, obtaining the polynomial equation for the regulation volume of the reservoir, in the second phase, descriptive and inferential statistics were applied to holistically visualize the historical hydrological data and develop mathematical equations of monthly rainfall projections of the area under study by applying the anomaly coefficients of the fourth report of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), based on the projected future weather conditions, which influence rainfall and evapotranspiration of the region in use of the historical data of the meteorological stations, finally in the third phase the monthly average precipitation-flow rate equation was grouped by grouping all the mathematical equations in a water balance digital, that allows to visualize the variations of the reservoir, estimating the volumetric behavior together with the entrances and exits of flows in addition to the restrictions of operation of the dam, proposing the sequences of the curves guides of operation based on the historical minimum, average and maximum through the simulation of multiple scenarios.

Keywords: Physiographic characteristics, pluvial projections, operation guide curve.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

En la zona centro-oeste de la provincia de Manabí, en el cantón Bolívar, se encuentra ubicada la represa La Esperanza, que almacena un volumen de 450 hm³, nace de un estudio realizado por investigadores alemanes en la década del 50 como respuesta a la problemática histórica de sequías, que causó desplazamiento poblacional en la zona de influencia hacia lugares con mayor oferta hídrica (BioManabí, 2012).

La cuenca hidrográfica que alimenta al embalse La Esperanza se encuentra entre el límite de la zonas seca y húmeda de la provincia, con una alta variabilidad pluviométrica, debido a su ubicación geográfica, cambio estacional y actualmente se suma a éste el cambio climático global.

La presa La Esperanza, en su proyecto original fue pensada solo con el fin de almacenar agua durante el período de lluvias, para dosificarlas en el período de época seca, no obstante, en el transcurso del tiempo, se han incorporado otros sistemas a la operación de la misma como son, el trasvase Daule Peripa - La Esperanza, el trasvase La Esperanza - Poza Honda, el sistema de riego Carrizal Chone, una estación generadora de 6 MW de potencia (actualmente sin uso), y por último, el acueducto La Esperanza - El Aromo (Refinería del Pacífico). Todo ello, unido a la disminución de la capacidad del río Carrizal aguas abajo de la presa, motiva la necesidad de un modelo de simulación dinámica en función de condiciones específicas para el correcto funcionamiento del sistema.

Actualmente la presa no cuenta con un plan de operación de máximas venidas, limitando a circunstancias inmediatas y necesidades que se presenten (Ortiz, 2015), que ha provocado el desborde del río Carrizal aguas abajo de la presa, inundando la población de Calceta (40 mil habitantes), y otras comunidades (10 mil habitantes); áreas agrícolas y ganaderas del valle, generando pérdidas incuantificables (Zambrano, 2012). Hasta el momento el caso más relevante en inundaciones se llevó a cabo entre el 16 y el 25 de marzo del 2012, donde todas las zonas bajas de la ciudad de Calceta se inundaron a causa del desborde del río Carrizal; siendo zona susceptible a inundaciones (Figura 1). Por otra parte, el párroco de ese entonces en la ciudad de Calceta, Darío Miasik (Peñafiel, 2012), sostuvo que lo ocurrido, no era culpa de la naturaleza, sino de la mano del hombre.

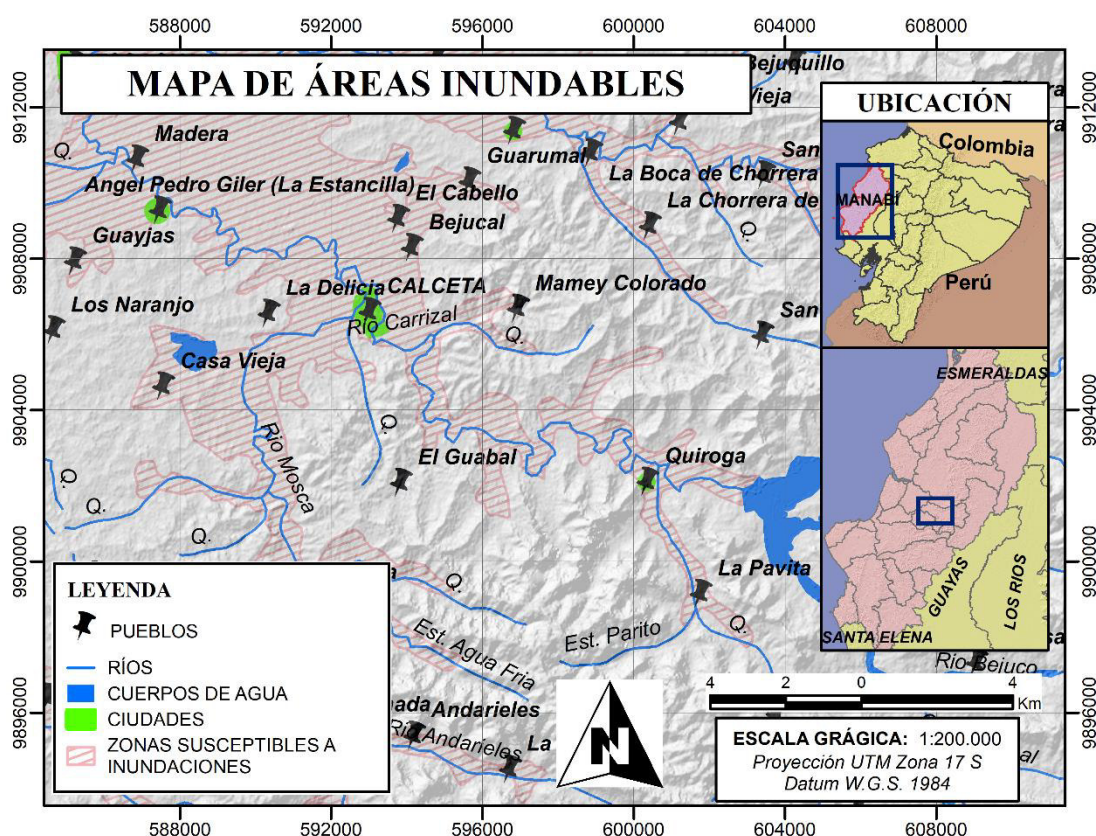


Figura 1. Áreas susceptibles a inundación

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cómo explicar un modelo de simulación dinámica que contemple condiciones fisiográficas, proyecciones meteorológicas en la obtención de curvas guías de operación en el aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es la característica superficial más influyente de la cuenca aportante al embalse La Esperanza, que incide en la capacidad de almacenamiento?
- ¿Cómo precisar las tendencias de precipitación mediante el ajuste de las ecuaciones mensuales en los diferentes escenarios de las anomalías meteorológicas?
- ¿Cuál debe ser la secuencia de las curvas guías de operación en condiciones de máxima, media y mínima precipitación a través de un balance hídrico digital en la regulación de volumen del embalse La Esperanza?

1.3. Justificación Teórica

El presente estudio giró alrededor de la teoría de los sistemas dinámicos (TSD), adaptado para el sistema hidrológico del embalse La Esperanza, en el cual se desarrolló diferentes procesos con orígenes diversos y el avance tecnológico que permitió la secuencia de la curva guía. La TSD se distingue entre las primeras teorías sistémicas, basadas en la concepción de partes como un todo (Ortiz y Maneiro, 2006).

Las aplicaciones de esta teoría se extienden a multitud de áreas del conocimiento, recayendo en la presente investigación como modelo de simulación dinámica aplicado al aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza, en el cual el volumen de almacenamiento es regido por un sistema

hídrico complejo, utilizando diversos métodos de investigación, basados en el análisis de series temporales, en estudios de casos y en la utilización de una herramienta de análisis de pensamiento sistémico. Para Martin (1997) la Dinámica de Sistemas es utilizada para entender cómo los sistemas cambian con el tiempo, constituyéndose en una herramienta de análisis predictivo.

Según el CAZALAC “Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe” y Rodhos Asesorías y Proyectos Ltda. (CAZALAC/RODHOS, 2006), establece que los modelos de simulación son una herramienta poderosa que permiten conocer los flujos que se producen entre los diversos elementos que configuran hídricamente un sistema. Todo proceso implica fundamentalmente, analizar toda la información de la que se dispone en relación al sistema, depurarla hasta reducirla a sus aspectos esenciales y reelaborarla de modo que pueda ser transcrita al lenguaje del modelo correspondiente (Ortiz y Maneiro, 2006).

Con lo expuesto se podría concluir que la TSD, está íntimamente ligado a todo tipo de sistema, razón primordial que justifica cualquier campo del conocimiento en los que se apliquen sistemas ya sean naturales o artificiales.

1.4. Justificación Práctica

En la última década el cambio climático ha tomado gran importancia en la mayoría de los países, cambio que ha venido a alterar el ecosistema, ocasionando desastres naturales, cada vez recurrentes, llevando al hombre a replantear todo tipo de planes operacionales. (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2008).

La justificación de esta investigación se centró en la necesidad de obtener un modelo de simulación dinámica para el embalse La Esperanza, que permita prever inundaciones y sequías aguas abajo. Con lo cual se pretende garantizar el almacenamiento del agua, y a su vez de contribuir con el control adecuado del recurso hídrico, asegurando el líquido vital de manera dosificada y continua para la zona de influencia. Presentando criterios con valor práctico, de relevancia metodológica y social.

Los cambios meteorológicos basados en el cambio climático implican la necesidad de modificaciones importantes en las políticas de gestión para embalses (Graham, 2004, Medellín *et al.*, 2008). No obstante, existen ciertas investigaciones de los posibles impactos que genera el cambio climático en las operaciones de presas individuales (Fearnside, 2005, Kang *et al.*, 2007, Kim *et al.*, 2009); actualmente la presente investigación es parte de un sistema de embalses que se está estudiando por separado.

Desde el ámbito legal esta propuesta se amparó en la constitución política del Ecuador (2008) en el título VII del régimen del buen vivir, capítulo segundo de biodiversidad y recursos naturales, sección sexta agua, referido en art. 411.- que dice textualmente: “El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico, que regule toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad del recurso hídrico y el ecosistema”.

El objetivo 7 del Plan Nacional Del Buen Vivir, hace mención a la sostenibilidad ambiental, sustentabilidad económica, a los derechos de la naturaleza, orientada al manejo del patrimonio hídrico enfocada en cuencas hidrográficas y caudales ecológicos, en el derecho y acceso al recurso agua (Plan nacional del buen vivir, 2017).

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Obtener un modelo de simulación dinámica para el embalse La Esperanza que incorpore, condiciones fisiográficas, proyecciones pluviales en la obtención de curvas guías de operación.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características superficiales de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.

- Elaborar el ajuste de las ecuaciones mensuales de proyección de la precipitación incorporando las anomalías meteorológicas en sus diferentes escenarios.
- Demostrar el funcionamiento de las curvas guías de operación en la regulación de volumen del embalse La Esperanza.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco filosófico o epistemológico de la investigación

El avance de tecnologías relacionadas a simulaciones por computadoras inicia en los años 40, junto a la evolución de la informática y el aumento de la creación de dispositivos portátiles y la normalización de hardware y software. Este vínculo es más estrecho en la actualidad por encaminado a la mejora de las prácticas de los científicos (Seoane *et al.*, 2015).

Según (Humphreys, 2004) el estudio epistemológico de los temas relacionados al uso de simulaciones por computadoras empezó a ser tomado en cuenta a finales del año 1990. El campo de la informática ha contribuido con un sinnúmero de herramientas para la ciencia, por lo que el uso de simulaciones computacionales se compara con el debut del telescopio y el microscopio estableciendo una mejora significativa en los métodos de la ciencia.

Los expertos en estudiar el conocimiento científico indican que las simulaciones por computadora son un novedoso instrumento y una nueva forma de producción científica (Galison, 1997; Winsberg, 2010). Los problemas epistemológicos que se plantean surgen recientemente, por ejemplo, la implementación de ecuaciones diferenciales como herramienta primordial en el campo de la física (Johnson y Lenhard, 2011; Keller, 2003), la relación de la modelización con las teorías (Winsberg, 2010), la clásica división entre teoría y métodos empíricos de la ciencia (Humphreys, 2004), el significado y objetivo de las explicaciones, tomando como punto fuerte, las simulaciones en su capacidad de predicción y no en su poder explicativo (Johnson y Lenhard, 2011).

La principal interrogante a discutir está relacionada con el nivel de las simulaciones como modelos relacionados con la parte teórica y experimental.

(Cartwright, 1999; Sismondo, 1999) sostienen que los modelos son parcialmente independientes de la teoría y del mundo, y tienen un componente autónomo que les permite actuar como instrumentos de exploración en ambos dominios.

Esta característica mediadora permite que en los modelos matemáticos se pueda comprender temas que serían imposible abordar solo con la teoría. Justamente, las simulaciones como modelos parecen encajar bien desde esta perspectiva: las simulaciones son herramientas de perfeccionamiento de los propios modelos con los cuales describir los fenómenos, en la medida que permiten evaluar los parámetros para determinar aquellos más relevantes (Seoane *et al.*, 2015).

Uno de los objetivos principales de los investigadores experimentales y teóricos es mejorar modelos ya existentes, en procesos como: cambiar, agregar y/o adaptar parámetros y ejecutar las simulaciones repetidamente (Frodeman, 2010; Winsberg y Fine, 2003). Esta relación de la teoría con la experimentación ha desconcertado a los epistemólogos de la ciencia que buscan comprender cómo “las simulaciones pueden tener rasgos epistemológicos y metodológicos en común con la experimentación, mientras mantienen el rol de una forma de teorización científica” (Winsberg y Fine, 2003).

Guillemot (2010) indica que, en la simulación virtual las teorías a ser comprobadas y los cálculos matemáticos por computadoras están en un continuo cambio; para comprobar una hipótesis esta se transforma en una serie de instrucciones o reglas establecidas que son insertadas en el modelo, para ser simulados. Para Radder (2003) y Winsberg (2010) trazan un estado epistemológico superior de los experimentos frente a las simulaciones, por su mayor potencial para hacer inferencias sobre el mundo y validar sus resultados, sin embargo, argumentan que no se puede hablar de superioridad epistemológica, aunque sí de prioridad: Los experimentos tienen el rol crucial de testar teorías, hipótesis y modelos.

Para alegar que sus resultados son confiables, los científicos que implementan simulaciones por computadoras usan diversas estrategias (Winsberg, 2010). Discutir el establecimiento de la base teórica del modelo, sobre la solidez de las técnicas matemáticas que se usan para la transformación de las ecuaciones en algoritmos, sobre la “calibración” de la simulación comparada con lo que se sabe del fenómeno (de forma directa con resultados experimentales, a partir del análisis o por comparación con otras simulaciones), esperando que el sistema responda como se espera cuando se varían los parámetros o que puede reproducir algunas relaciones básicas que son predichas por leyes o teorías fenomenológicas.

2.2. Antecedentes de investigación

Los antecedentes de la presente investigación se la plantean desde dos puntos de vista, la primera en función de la historia del modelo de simulación y la segunda fundamentada en las investigaciones realizadas acerca de la temática de estudio, que la llamaremos “arte en cuestión”.

2.2.1. Antecedente histórico

En la década de los 60’s el Dr. Jay W. Forrester del Instituto de Tecnología de Massachusetts, inicia el estudio denominado Dinámica Industrial, perteneciente a la dinámica de sistemas, a mediados de la misma década, aplicó la dinámica urbana donde las variables en estudio eran los habitantes, vivienda, empresas etc. de dicha zona (Martin, 1997).

Posteriormente, Forrester realizó un estudio que consistía en el análisis de la evolución de una serie de magnitudes agregadas a nivel mundial como son la población, los recursos y la contaminación. A raíz de la realización de este último estudio, se puso de manifiesto que la Dinámica Industrial y Urbana eran conceptos que no abarcaban completamente este nuevo análisis y se acordó en adoptar la denominación de Dinámica de Sistemas, con la que se conoce actualmente, esta se la puede definir como una metodología utilizada para entender cómo los sistemas cambian con el tiempo (Ortiz y Maneiro, 2006).

Este enfoque proporciona una herramienta de comunicación común que conecta muchas disciplinas académicas como: La biología, ecología, física, matemáticas, ciencias sociales, económicas y literatura. Esta entrega una actitud crítica frente a problemas, lo que se logra a partir de un proceso en el que se debe desarrollar y analizar la estructura de un sistema. Permite probar cómo responderá el sistema bajo diferentes conjuntos de condiciones (Martin, 1997).

2.2.2. Antecedente del arte en cuestión

La presa La Esperanza desde el inicio de su operación (1995), respondió a un único plan operacional; que luego quedó obsoleto, por lo expuesto en la situación problemática; es así que nace la presente investigación "Modelo de simulación dinámica aplicado al aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza, Manabí-Ecuador", como propuesta para la toma de decisiones.

Cabe recalcar que en Octubre del 2015 se presenta la investigación titulada: "Definición de las reglas de operación hidráulica del embalse La Esperanza" como parte de un estudio de maestría en la Universidad de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, a cargo del señor ingeniero Efrén Wilfrido Ortiz Moya, en el cual describe guías relacionadas al manejo y operación de la presa La Esperanza orientado a una eficiente condición en la obtención de una laminación de avenidas, describiendo sistemas de la presa y embalse en un manual para la operación relacionada al tema de laminación, constituyendo esta investigación en un antecedente real del objeto de estudio.

Hay investigaciones que tratan la temática de simulaciones de reservorios y otras que abordan los conceptos relacionados, los cuales se encuentran en la página del "Tsauro de la Unesco", con la palabra clave: "Embalse".

A continuación, dos investigaciones doctorales recientes y acordes con la temática en cuestión, resumen lo siguiente:

- El esfuerzo por diseñar un buen sistema de apoyo a la decisión, se lleva a cabo después del estudio de diferentes herramientas de software, en

el cual cada aplicación requiere de diferentes arquitecturas de entrada-proceso-salida, las cuales son muy populares entre los sistemas de simulación basados en modelos, pero hoy en día un enfoque centrado en datos, se utiliza a menudo como la arquitectura preferida para sistemas de apoyo a la decisión (Li, 2013).

- La operación de los embalses es un problema de optimización multiobjetivo, resuelto tradicionalmente con la programación dinámica (DP) y algoritmos de programación dinámica estocástica (SDP), en los cuales se incluye un algoritmo anidado en cada transición de estado, por medio del cual se reduce la dimensión inicial del problema y alivia la maldición de la dimensionalidad, pudiendo resolver problemas de optimización, sin aumentar significativamente la complejidad del algoritmo (Delipetrev, 2016).

2.3. Bases teóricas

La presente investigación, propone la alternativa de aplicar un modelo de simulación dinámica en los que se considera distintos escenarios meteorológicos del entorno. Este estudio permite estimar, comparar y optimizar el comportamiento de sus procesos simulados en un espacio de tiempo, además del análisis para la toma de decisiones. Con la ayuda del correspondiente soporte informático, el modelo de simulación tiene la capacidad de considerar complejas tareas, interrelacionarlas y proyectarlas mediante la realización de muchas combinaciones, en cuestión de segundos, el cual se traduce en un gran número de escenarios y de posibles resultados, imposibles de abarcar y valorar sin la ayuda de un modelo de simulación computarizado.

Como es de conocimiento general, las bases teóricas incluyen los supuestos de la investigación que se definen como el fundamento teórico que se asume como dado, y que por tanto no es objeto de cuestionamiento por el investigador, sino más bien se deriva del mismo. Las principales teorías que fundamentan el problema y las hipótesis de la presente investigación, se detallan a continuación:

2.3.1. Teoría General de Sistemas (TGS)

La teoría general de sistemas es presentada de forma metódica y científica de aproximación y representación de la realidad orientada a una práctica estimulante para trabajos en diversos campos científicos.

El paradigma científico de la TGS se caracteriza por su perspectiva holística e integradora, en donde lo importante son las relaciones y los conjuntos que a partir de ellas emergen. En la práctica la TGS ofrece un ambiente adecuado para la interrelación y comunicación fecunda entre especialistas y especialidades (Arnold y Osorio, 1998).

Bajo las consideraciones anteriores, la TGS es un ejemplo de perspectiva científica (Arnold y Rodríguez, 1990). En sus distinciones conceptuales no hay explicaciones o relaciones con contenidos preestablecidos, pero sí con arreglo a ellas, podemos dirigir nuestra observación haciéndola operar en contextos reconocibles (Arnold y Osorio, 1998).

2.3.1.1. Objetivos Originales de la Teoría General de Sistemas

- Promover el desarrollo de términos generales que permitan describir las características, funciones y comportamientos de los sistemas.
- Promover leyes aplicables a todos estos comportamientos.
- Promover una formalización (matemática) de estas leyes.

Se considera a Ludwig von Bertalanffy (1901-1972) como el primero en desarrollar una formulación, quien acuñó el término "Teoría General de Sistemas". Para él, la TGS debería constituirse en un mecanismo de integración entre las ciencias naturales y sociales y ser al mismo tiempo un instrumento básico para la formación y preparación de científicos.

2.3.1.2. Clasificaciones Básicas de Sistemas Generales

De acuerdo a su naturaleza los sistemas pueden ser:

- **Determinístico:** Si el sistema no contiene ningún elemento aleatorio es un sistema determinístico. En este tipo de sistema, las variables de salidas e internas quedan perfectamente determinadas al especificar las variables de entrada, los parámetros y las variables de estado, es decir que están perfectamente definidas las relaciones útiles entre las variables del sistema. El calentador eléctrico es un sistema determinístico (Law y Kelton, 1991).
- **Estocástico:** En este caso el sistema tiene una conducta intrínseca, entonces, con las entradas definidas es imposible asegurar la salida (Klyatskin, 2005). Por ejemplo, una máquina tragamonedas donde la acción de (tirar la palanca) se obtiene un resultado incierto (ganar o perder). Si un sistema determinístico se alimenta con entradas estocásticas, se obtiene una respuesta estocástica. Por ejemplo, la temperatura ambiente es una variable estocástica que afecta la respuesta del calentador eléctrico. En el mundo real, los sistemas siempre tienen elementos estocásticos ya sea por su propia naturaleza o porque son fenómenos no comprendidos actualmente; por ejemplo, a los astrónomos de la antigüedad le podía parecer que los eclipses eran fenómenos aleatorios, hoy ellos son predichos.
- **Continuo:** Sucede cuando las relaciones entre las variables del sistema solo admiten que el estado evolucione en el tiempo en forma continua (basta que una variable evolucione continuamente) (Cellier, 1991).
- **Discreto:** Se tiene un sistema discreto cuando las relaciones funcionales del sistema solo permiten que el estado varíe en un conjunto finito (contable) de puntos temporales. Las causas instantáneas de los cambios de estados se denominan eventos. El interruptor del calentador es un subsistema discreto porque la intensidad solo puede variar en los instantes que se abre o se cierra el interruptor. Accionar el encendido y el apagado del interruptor son eventos. El comportamiento del sistema continuo puede variar a discreto si se le aplica entradas discretas, los sistemas reales son combinaciones de continuos y discretos (Arnold y Osorio, 1998).

2.3.2. Teoría de la Simulación

Se puede considerar a la teoría dinámica de sistemas como la predecesora a la teoría de simulación, la teoría dinámica de sistemas se basó en la teoría de los sistemas formados por partes mecánicas y electrónicas donde su característica principal es la realimentación de información (Aracil, 1992). Con la realimentación del sistema se obtiene continuamente información con el cual los resultados servirán para tomar decisiones sucesivas (López, 2015). La hipótesis de los servomecanismos consta de dos características primordiales: El estudio sistemático del concepto de realimentación y un amplio desarrollo del estudio del comportamiento dinámico de los sistemas, donde se encuentra el germen de la noción de sistema dinámico.

Estas ideas de realimentación y de sistema dinámico se aplicaron más en el estudio de procesos socioeconómicos, que en procesos tecnológicos. En esta área de conocimiento se desarrolló la teoría de simulación, que podría definirse como un medio que experimenta un modelo detallado de un sistema real para determinar cómo responderá el sistema a los cambios en su estructura o entorno (Harrell y Tumay, 1995). Por otro lado, se podría afirmar que la simulación permite experimentar un modelo del sistema para comprender mejor los procesos (Harrington y Tumay, 1999).

2.3.2.1. Etapas de una simulación

El proceso de simulación consta de las siguientes etapas:

- **Formulación del problema:** Este paso debe quedar perfectamente establecido el objeto de la simulación. El cliente y el desarrollador deben acordar lo más detalladamente posible los siguientes factores: Los resultados que se esperan del simulador, el plan de experimentación, el tiempo disponible, las variables de interés, el tipo de perturbaciones a estudiar, el tratamiento estadístico de los resultados, la complejidad de la interfaz del simulador, etc. Se debe establecer si el simulador será operado por el usuario o si el usuario solo recibirá los resultados. Finalmente, se debe establecer si el

usuario solicita un trabajo de simulación o un trabajo de optimización (Banks *et al.*, 1996).

- Definición del sistema: El sistema que realiza la simulación debe estar bien determinado y acordar con el técnico simulador los límites del sistema que se desea estudiar y la correlación con el ambiente (Carson, 2004).
- Formulación del modelo: Inicia con el desarrollo de un modelo simple que captura los aspectos relevantes del sistema real que dependen de la formulación del problema, para un ingeniero de seguridad los aspectos relevantes de un automóvil son diferentes de los aspectos considerados por un ingeniero mecánico para el mismo sistema. El modelo simple se irá enriqueciendo como resultado de varias interacciones (Banks *et al.*, 1996).
- Colección de datos: Consiste en la obtención de los datos referentes a las variables definidas, preferiblemente tomados directamente del sistema a simular, con la precaución de que no haya ninguna alteración del comportamiento habitual de las respectivas variables (Herrera y Becerra, 2014).
- Implementación del modelo en la computadora: Los modelos se ejecutan mediante el uso de lenguajes de programación. Existen lenguajes específicos de simulación que facilitan esta tarea; también, existen programas que ya cuentan con modelos implementados para casos especiales.
- Verificación: Consiste en verificar si el modelo operacional funciona correctamente.
- Validación: La validación es la determinación de que el modelo conceptual, donde los resultados se comprueban con datos de la representación del sistema real (Modelado versus Observado).
- Diseño de experimentos: Para cada escenario que se va a simular, las decisiones deben ser realizadas en relación con la duración de la simulación, el número de repeticiones y la forma de inicialización, según sea necesario.

- Experimentación: Se ejecutan las simulaciones, los datos obtenidos son almacenados y procesados.
- Interpretación: Se analiza la sensibilidad del modelo con respecto a los parámetros que tienen asociados la mayor incertidumbre. Si es necesario, se deberán recolectar datos adicionales para refinar la estimación de los parámetros críticos (Banks *et al.*, 1996).
- Implementación: Es recomendable asistir al cliente en la etapa de implementación para evitar el mal uso del simulador o la mala interpretación de los resultados del mismo.
- Documentación: Debe prepararse con la información obtenida de la simulación, describiendo en detalle lo que se debe hacer. Este documento es importante para especificar y detallar las rutas necesarias a seguir para los cambios se realicen (Renan, 2015).

2.3.2.2. Ventajas de la Simulación

Harrington y Tumay (1999) exponen las siguientes razones para utilizar la teoría de la simulación como herramienta de apoyo:

- La simulación predice cómo un sistema responde a los cambios.
- La simulación permite un análisis de las variaciones del sistema desde una perspectiva más amplia.
- La simulación promueve soluciones totales.
- La simulación es efectiva para el control de costes.
- La simulación procura un enfoque cuantitativo para medir la actividad.

2.3.2.3. Simulación Computarizada

La simulación computarizada fue utilizada por primera vez en la industria de defensa en los años 50. Los primeros modelos de simulación fueron contruidos utilizando lenguajes de programación tales como FORTRAN y Run on Mainframes (Harrington y Tumay, 1999).

2.4. Bases Conceptuales

2.4.1. Modelo de Simulación Dinámica

El proceso de modelado consiste en un conjunto de operaciones mediante el cual, tras el oportuno estudio y análisis, se construye un modelo a partir de una situación problema, el cual debe representar de la mejor manera posible la situación. Este proceso implica, fundamentalmente, analizar toda la información de la que se dispone en relación al sistema, depurarla hasta reducirla a sus aspectos esenciales, y reelaborarla de modo que pueda ser transcrita al lenguaje del modelo correspondiente (Ortiz y Maneiro, 2006).

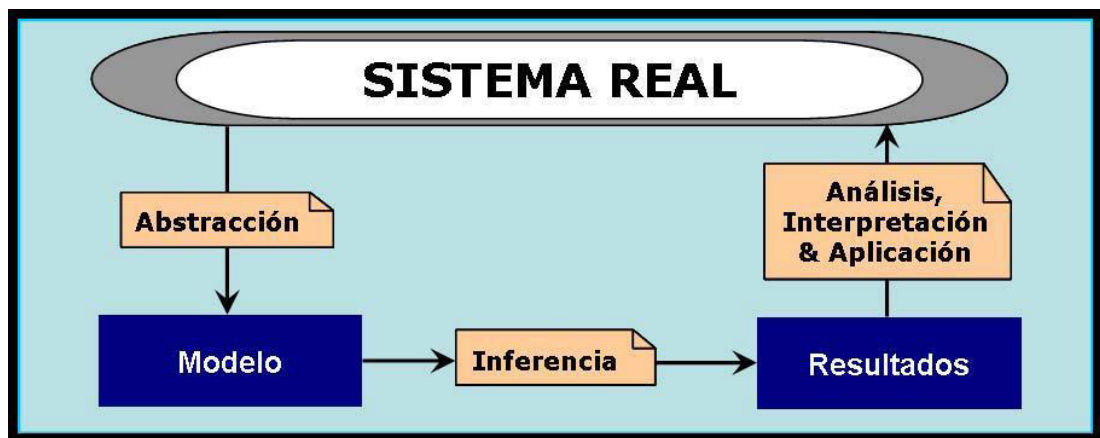


Figura 2. Esquema general del proceso de modelado científico.

Fuente: Izquierdo *et al.*, 2008

2.4.2. Características Fisiográficas

De acuerdo con Llerena (2003), se considera a una cuenca como la unidad territorial natural más importante ya que a partir de esta apreciación se puede comprender que únicamente en la cuenca se pueden realizar balances hídricos; es decir, cuantificar la oferta de agua que produce la cuenca durante el ciclo hidrológico como medio colector-almacenador-integrador de los procesos naturales y antrópicos que ocurren en la cuenca, ésta puede ser también una unidad política, administrativa, de gestión ambiental o de manejo de los diversos recursos naturales que alberga. Por ello, es importante conocer los procesos físicos de generación y circulación por las que pasa el agua dentro de una cuenca. En la cuenca hidrográfica se distinguen tres

partes: alta, media y baja que dependen de las características fisiográficas y procesos hidrometeorológicos.

2.4.2.1. Embalse

Es la acumulación de agua producida por una obstrucción de un curso hídrico superficial geográfico que cierra parcial o totalmente su cauce. La obstrucción de éste puede ocurrir por causas naturales o artificiales, así tenemos las construidas por el hombre, como son las presas.

Cuadro 1. Clasificación de embalse según su tamaño

TAMAÑO DEL EMBALSE (Mm³)	DESCRIPCIÓN
✓ 100,000 Mm ³	Embalses gigantes
100,000 Mm ³ ✓ 10,000 Mm ³	Embalses muy grandes
10,000 Mm ³ ✓ 1,000 Mm ³	Embalses grandes
1,000 Mm ³ ✓ 1 Mm ³	Embalses medianos
✓ 1 Mm ³	Embalses pequeños o pondajes

Fuente: Villamizar, 1989

Villamizar (1989) por su parte contribuye desde otro punto de vista, esta vez a la clasificación de los embalses, bajo el criterio de su tamaño respecto al volumen para las que son construidas.

2.4.2.2. Presa

En ingeniería es una barrera fabricada de piedra, hormigón o materiales sueltos, que se construye habitualmente en una cerrada o desfiladero sobre un río o arroyo para almacenar agua en el cauce fluvial y elevar su nivel con el objetivo de utilizarla en regadío, laminación de avenidas (evitar inundaciones aguas abajo de la presa) o para la producción de energía eléctrica mediante el uso de turbinas accionadas por la fuerza del agua, la energía que produce la fuerza del agua puede aprovecharse de forma directa, como en los molinos o de forma indirecta en la producción de energía eléctrica.

2.4.2.3. Cuenca Hidrográfica

Se conoce como cuenca hidrográficas al sistema natural de drenaje donde una red de sistemas hidrológicos fluye hacia un cauce principal delimitada por las líneas divisorias de agua (Maass y Colter, 2007). La cuenca hidrográfica, también conocida como cuenca de captación o colectora, es una unidad geográfica conformada por un río principal y por todos los territorios comprendidos entre la naciente y la desembocadura de ese río (Geraldi *et al.*, 2010),(Figura 3). Está compuesta de todas las áreas y ríos menores que aportan agua al cauce principal, incluyendo también las zonas marino-costera, cuando el agua desemboca al mar (UICN, 2009).

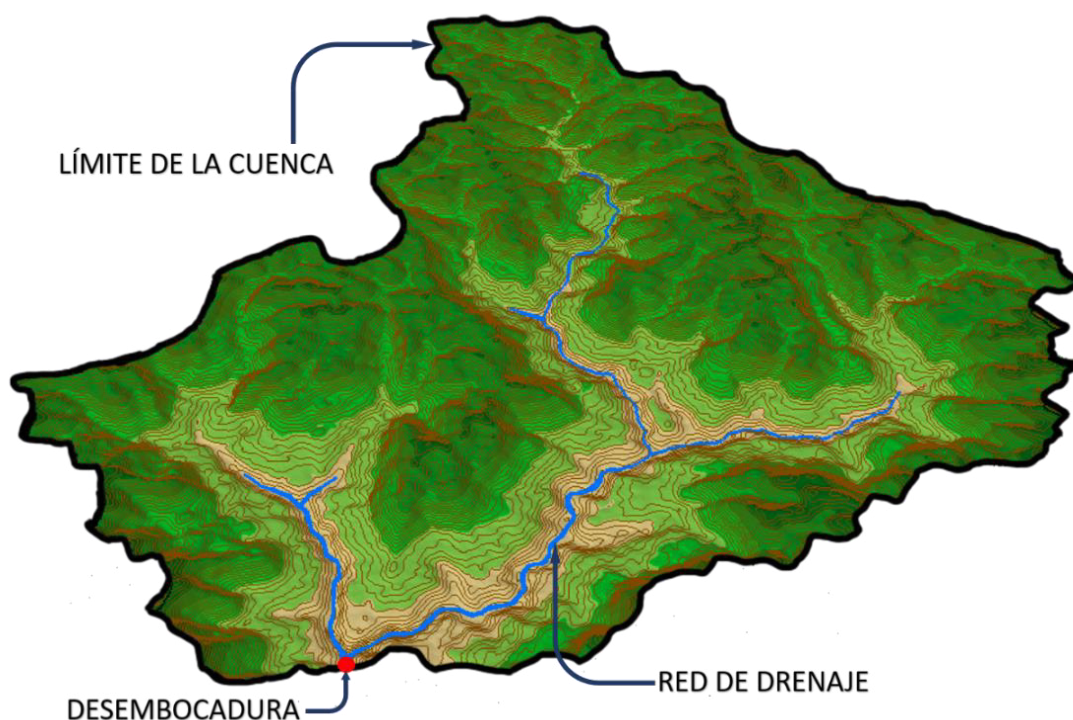


Figura 3. Representación esquemática de una cuenca hidrográfica

2.4.2.4. Clasificación de una cuenca

Las cuencas se pueden clasificar tomando en cuenta la superficie de la misma, en este sentido (Campos, 1998) las clasifica de acuerdo al siguiente cuadro:

Cuadro 2. Descripción de cuencas de acuerdo a su superficie

TAMAÑO DE LA CUENCA (Km ²)	DESCRIPCIÓN
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia - Pequeña
500 a 2500	Intermedia - Grande
2500 a 50000	Grande
> 50000	Muy grande

Fuente: Campos, 1998

2.4.2.5. Características de las cuencas hídricas

Aparicio (1999) menciona que el ciclo hidrológico visto a nivel de una cuenca, se puede esquematizar como un estímulo construido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación y que están controlados por las características morfológicas y superficiales de la cuenca.

2.4.2.6. Área de la cuenca (A)

La superficie de drenaje de una cuenca es la variable más utilizada para el cálculo de otros parámetros que consecuentemente serán dependientes de ella (Jardí, 1985). El área se expresa en kilómetros cuadrados, a excepción de las cuencas pequeñas, que se pueden expresar en hectáreas y su cálculo se obtienen con la ayuda de los SIG (Sistemas de Información Geográficos) o con otros métodos aproximativos entre los que se incluyen el método del papel cuadriculado con ayuda del planímetro. El tamaño relativo de estos espacios hidrológicos define o determinan, aunque no de manera rígida, los nombres de microcuenca, subcuenca o cuenca.

2.4.2.7. Perímetro de la cuenca (P)

Jardí (1985) considera como perímetro de una cuenca al contorno que encierra la superficie de una cuenca expresada en unidades de longitud. Entendiéndose por parteaguas a la línea imaginaria que une los puntos de

mayor altitud y que divide el flujo de las aguas producido por las precipitaciones en direcciones opuestas.

2.4.2.8. Coeficiente de Compacidad o índice de Gravelius (Kc)

El coeficiente de compacidad, es el resultado de la división entre el perímetro de una cuenca y el perímetro de un círculo de igual superficie, lo que significa que entre más circular sea la forma de la cuenca el coeficiente de compacidad será cercano a un valor de 1 y la respuesta hidrológica será más rápida, representada por la siguiente fórmula:

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (2.1)$$

Donde:

P: Perímetro de la cuenca (Km).

A: Área de la cuenca (Km²).

Cuadro 3. Parámetros del Índice de Compacidad de una cuenca hidrográfica

ÍNDICE DE COMPACIDAD	FORMA DE LA CUENCA	TENDENCIA A LAS CRECIDAS
1,00 - 1,25	De casi redonda a oval redonda	Alta
1,25 – 1,50	De oval redonda a oval oblonga	Media
1,50 – 1,75	De oval oblonga a rectangular oblonga	Baja
> 1,75	Oblonga	Muy baja

Fuente: Heras, 1976

Heras (1976) propuso en una publicación algunas características fisiográficas de las cuencas, entre ellas el índice de compacidad, que según el valor numérico que exprese puede asignarse una forma determinada a la cuenca hidrográfica, como también la tendencia a las crecidas.

2.4.2.9. Longitud de cuenca (L)

Se entiende por longitud de la cuenca a la distancia obtenida desde el punto inicial de mayor elevación aguas arriba siguiendo el cauce principal del río, hasta el punto de desagüe o desemboque. La anchura media se obtiene dividiendo el área por la longitud de la cuenca (Choquehuanca, 1999).

2.4.2.10. Factor de forma (Kf)

El factor de forma tiene relación con la respuesta hidrológica de la cuenca debido a la forma de la misma. Dicho factor se define como la relación entre el ancho medio (B) y la longitud de cuenca (L). El ancho medio se obtiene al dividir el área (Km²) por la longitud de cuenca (Km) (Choquehuanca, 1999).

$$Kf = \frac{B}{L} = \frac{\frac{A}{L}}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (2.2)$$

Donde:

B: Ancho medio de la cuenca (Km).

L: Longitud de la cuenca (Km).

A: Área de la cuenca (Km²).

2.4.2.11. Ciclo hidrológico

El vapor de agua producto de la evaporación, se condensa en la atmósfera formando nubes, las cuales al reunir ciertas condiciones precipitan llegando a la tierra o a los océanos. Parte del agua de precipitación puede ser interceptada por las plantas, escurrir sobre la superficie de los suelos o infiltrarse al subsuelo; gran parte del agua vuelve a la atmósfera por medio de la evapotranspiración de la cobertura vegetal, evaporación de los espacios superficiales de agua y humedad del suelo. El agua infiltrada puede percolar a zonas profundas, almacenándose en acuíferos subterráneos, las cuales pueden aflorar como manantiales, agregándose a corrientes superficiales y llegar a los mares y océanos para ser evaporada cerrando así el ciclo del agua o ciclo hidrológico. Por lo tanto, se puede observar que en el ciclo hidrológico intervienen procesos complicados de evaporación, transpiración, infiltración, percolación, afloramiento, almacenamiento y esorrentía (Mejía, 2012).

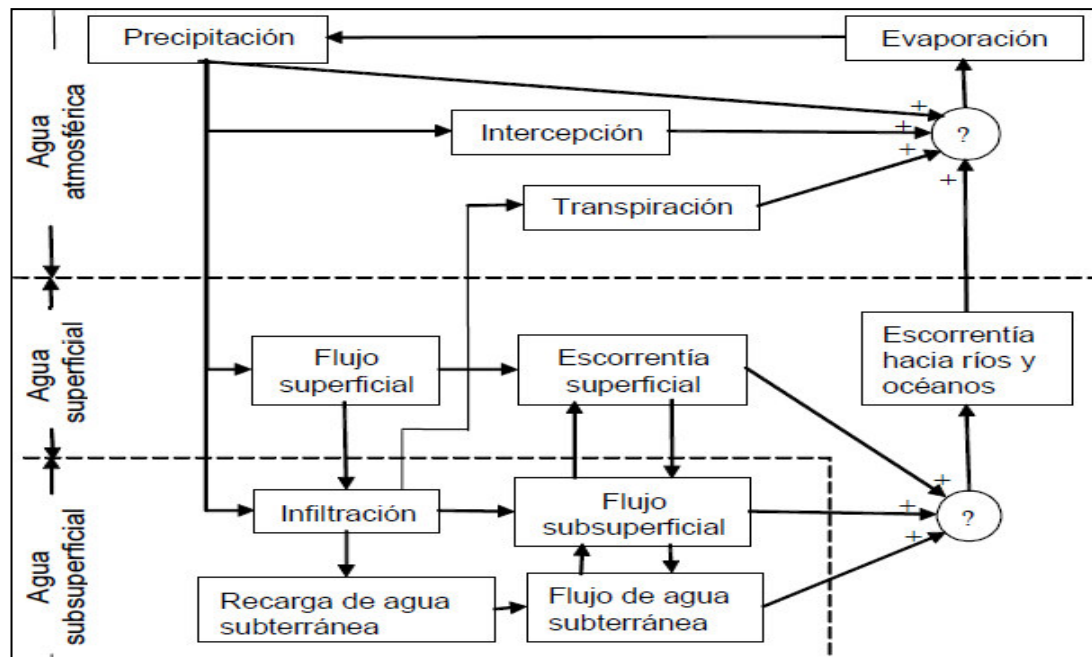


Figura 4. Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global. Fuente: Chow *et al.*, 1964

Para Mejía (2012), los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos, por lo que nunca serán conocidos completamente. Sin embargo, a falta de una concepción perfecta, pueden ser representados de forma simplificada, mediante el concepto de "SISTEMA", que es considerado como un conjunto de partes que interactúan como un todo.

2.4.2.12. Balance hídrico

El Balance Hídrico consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa al conjunto de una cuenca o a una cierta parte de ella, definida por unas determinadas condiciones de contorno. Durante un determinado período de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia del total de entradas y el total de las salidas debe ser igual a la variación en el almacenamiento. Dado que la cantidad de agua en la Tierra es finita, el sistema hidrológico global, puede ser considerado cerrado.

Cuadro 4. Distribución de Agua en el Planeta

Fuente	Área	Volumen	Porcentaje de agua total	Porcentaje de agua dulce
	10 ⁶ Km ²	Km ³		
Océanos	361,30	1338000000	96,538	
Agua subterránea: Dulce	134,80	10530000	0,7597	30,06
Agua subterránea: Salada	134,80	12870000	0,9286	
Humedad del suelo	82,00	16500	0,0012	0,047
Hielo polar	16,00	24023500	1,7333	68,58
Hielo no polar y nieve	0,30	340600	0,0246	0,972
Lagos: Dulce	1,20	91000	0,0066	0,260
Lagos: Salado	0,80	85400	0,0062	
Pantanos	2,70	11470	0,0008	0,033
Ríos	148,80	2120	0,0002	0,006
Agua biológica	510,00	1120	0,0001	0,003
Agua atmosférica	510,00	12900	0,0009	0,037
Agua total	510,00	1385984610	100,00	
Agua dulce	148,80	35029210	2,527	100,00

Fuente. UNESCO, 1978

Cuadro 5. Balance Global Anual del Agua

Fuente	Unidades	Océano	Tierra
Área	Km ²	361300000	148800000
Precipitación	Km ³ /año	458000	119000
	mm/año	1270	800
Evaporación	Km ³ /año	505000	72000
	mm/año	1400	484
Escorrentía hacia los océanos			
Ríos	Km ³ /año		44700
Agua Subterránea	Km ³ /año		2200
Escorrentía total	Km ³ /año		47000
	mm/año		316

Fuente. UNESCO, 1978

Hay que distinguir dos características esenciales en un balance: La primera de ellas es su carácter espacial, es decir la unidad de control sobre la que se va aplicar la ecuación de continuidad. La segunda característica es su carácter temporal o elección del período de tiempo en el cual se va a evaluar el balance. La unidad de tiempo suele ser el año hidrológico, aunque se pueden realizar balances a escalas menores como meses y días.

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i A_i}{\sum A_i} \quad (2.3)$$

Donde

\bar{P} = Precipitación media

P_i = La media entre las dos isoyetas que delimitan el área A_i

A_i = Área entre isoyetas

Cabe mencionar que es un método flexible, pero es necesario tener una red de estaciones meteorológicas para construir correctamente las gráficas de isoyetas, tomando en cuenta el criterio del hidrólogo. Se pueden implementar el trazado de datos diversos en la zona de estudio como topografía, vientos, temperatura, lluvias, entre otros (Mejía, 2012).

2.4.2.15. Evaporación

Es el proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial.

2.4.2.16. Evapotranspiración

Es la pérdida de humedad de un área por evaporación directa, a esto también se incluye la pérdida de agua por transpiración de la flora. Es expresada en milímetros por unidad de tiempo (Díaz y Torres, 2011).

Turc y Coutagne propusieron fórmulas empíricas basados en comparaciones de precipitaciones y escorrentías de numerosas cuencas hidrográficas (Sánchez, 1992) y Thornthwaite caracterizó la evapotranspiración potencial en función de la temperatura media diaria y las horas sol que depende de la posición geográfica del área en estudio.

Fórmula de TURC

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (2.4)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en mm/año

P = Precipitación en mm/año

$L = 300 + 25t + 0,05t^3$

t = Temperatura media anual en °C

Fórmula de COUTAGNE

$$ETR = P - XP^2 \quad (2.5)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en mm/año

P = Precipitación en mm/año

$$X = \frac{1}{0,8 + 0,14T}$$

T = Temperatura media anual en °C

Fórmula de THORNTHWAITE

$$E_0 = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (2.6)$$

$$a = 0,000000675 I^3 - 0,0000771 I^2 + 0,00179 I + 0,49$$

$$I = \sum_{1}^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1,5}$$

Donde:

E_0 = Evapotranspiración potencial en mm/mes.

T = Temperatura media mensual en °C.

I = Índice térmico anual.

2.4.2.17. Caudales fluviales

Se define como caudal a la cantidad de agua que lleva un río, la cual varía en el transcurso del año dependiendo de la época, los caudales fluviales y ríos pueden ser temporales o permanentes; estos nacen desde las zonas más altas por las precipitaciones o deshielos y con la acción de la gravedad fluyen hasta las zonas más bajas como mares o lagos, aumentando su caudal y dimensiones, transportando el agua de escorrentías (Fernández, 2013).

2.4.2.18. Escorrentías

González (2010) explica que el agua que fluye sobre las laderas provenientes de las precipitaciones o deshielos, van formando flujos concentrados que llamamos escorrentías y se van acoplando a los ríos en dirección a la corriente.

2.4.2.19. Textura de suelo

Para Orsag (2010) la textura del suelo se compone de diferentes porcentajes de limo, arena y arcilla contenido en el suelo. La combinación de las diferentes texturas le da al suelo un equilibrio diferente al momento que los vacíos de poros son llenados de agua y que al formar parte de laderas con pendientes pronunciadas producen deslizamientos que se alojan en zonas con depresión formando sedimentos.

Según Montaña y Solórzano (2015), la textura del suelo encontrado en la cuenca aportante al embalse La Esperanza son de tipo franco con tendencia de tipo franco arcillosas que contienen las siguientes características físicas descritas en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Propiedades físicas del suelo en la cuenca aportante del embalse La Esperanza

Parámetros	Unidad	Suelo de uso forestal (franco)			Suelo de uso ganadero (franco)		
		Arena	Limo	Arcilla	Arena	Limo	Arcilla
Textura	%	40	36	25	38	42	21
Densidad aparente	g/cm ³	0,91			1,29		
Densidad real	g/cm ³	2,47			2,27		
Porosidad	%	62,93			43,03		
Humedad	%	19,10			15,50		
Conductividad hidráulica	m/s	0,0000371			0,0000220		
Velocidad de infiltración	cm/h	10,05			0,51		

Fuente: Montañó y Solórzano, 2015

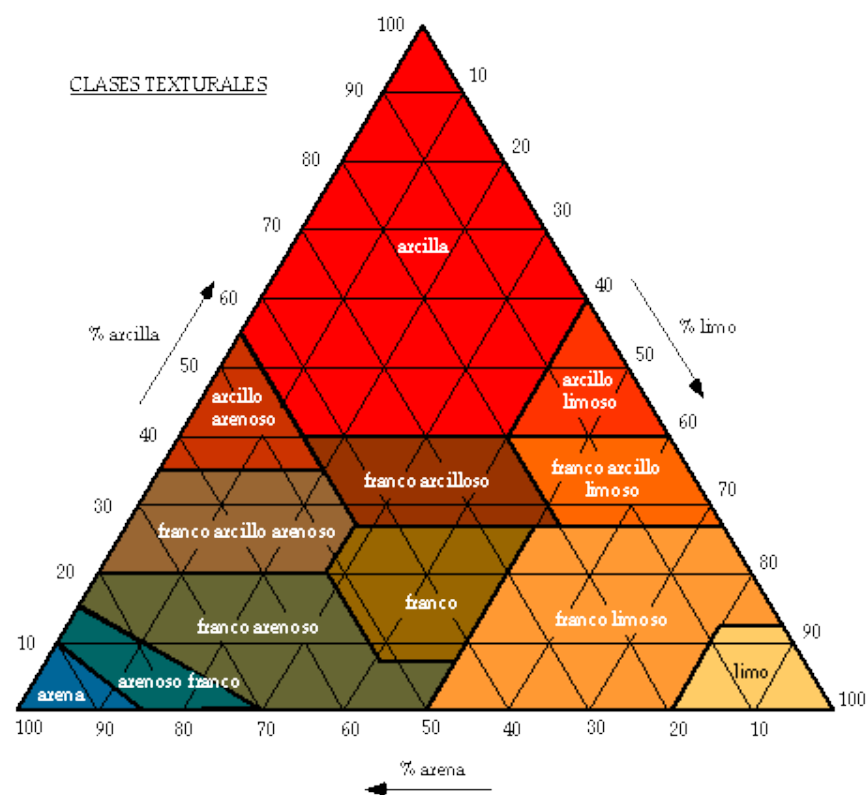


Figura 6. Triángulo textural según el tamaño de las partículas (USDA)

2.4.2.20. Sedimentos

Un ascenso o descenso en el lecho de un río a lo largo del tiempo y distancias, son resultados de transformaciones naturales o provocados y se lo conoce como el concepto de continuidad de los sedimentos, el cual se lo usa para analizar cualitativa y cuantitativamente los cambios en el lecho. El material transportado o depositado por un río depende del suministros de sedimentos y la capacidad de transporte del río (Ochoa, 2011).

2.4.2.21. Infiltración y percolación

Se le llama infiltración cuando el agua de la superficie penetra o es absorbida por el suelo, ésta se limita al agua en forma líquida y es precisamente descriptiva de los procesos físicos por los cuales la lluvia entra al suelo; así mismo, la absorción, la imbibición y la percolación se usan a menudo en el mismo sentido. Por lo cual, es factible restringir el uso de "percolación" al flujo descendente libre por la gravedad del agua en la zona de aireación, siendo un proceso para el cual se necesita un término distintivo (Horton, 1933).

2.4.3. Eventos meteorológicos extremos (sequías – lluvias torrenciales)

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), define evento meteorológico extremo “como un episodio, suceso o evento meteorológico raro o infrecuente, según su distribución estadística para un lugar determinado. Y según esta definición, por “raro” debe entenderse todo episodio que se encuentre por encima del percentil 90 o por debajo del 10 en la función de probabilidad observada”.

Por otra parte, “The National Geographic”, nos indica que, según los expertos en climatología, el cambio climático influye causando sequías más persistentes y temperaturas más altas en unas regiones, mientras que en otras provoca lluvias torrenciales.

2.4.3.1. Sequías

Es considerada la anomalía de un período de precipitación por debajo de la media en una determinada zona, lo que resulta en una escasez extendida o déficit notable del abastecimiento de agua (Márdero *et al.*, 2012), este fenómeno ha provocado graves crisis de subsistencia a lo largo de la historia y hoy en día sigue ocasionando bruscos problemas, lo que ha provocado desequilibrios (García y Pérez, 2005).

2.4.3.2. Lluvias torrenciales

Son precipitaciones que exceden los límites normales y mediante el escurrimiento superficial crean una corriente de masa de agua que llegan a transportar volúmenes importantes de sedimentos y escombros, con velocidades peligrosas para los habitantes e infraestructura ubicados en las zonas de acumulación (Caballero, 2011).

2.4.4. Inundaciones

Se define las inundaciones como el rebose de los límites regulares de trayectoria de un flujo u otro cuerpo de agua, en el caso de la acumulación de la misma sobre áreas, que por lo general no están sumergidas (IPCC, 2012). Algunos componentes repercuten sobre el aumento de las inundaciones, entre ellos resaltan los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico y la falta de ordenamiento territorial en zonas de riesgos (Arreguín y López, 2016).

2.4.5. Proyecciones Pluviales

Los recursos hídricos están sujetos a sufrir cambios significativos debido a la variabilidad en los períodos de lluvias y a los cambios estacionales (Tsanis *et al.*, 2011). Tendencias globales en la precipitación, escorrentía y humedad del suelo son más inciertas debido en parte a la alta variabilidad espacial y temporal (Huntington, 2010).

2.4.5.1. Cambio Climático Global

Para el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Intergubernamental Panel on Climate Change, IPCC), el cambio climático es la variación del patrón del clima y los cambios relacionados en los océanos, la superficie terrestre y las capas de hielo. Entendiéndose por ende como calentamiento global al aumento de la temperatura media terrestre, siendo evidente a principios del siglo XX, y más notable desde finales de la década de 1970, producido por las emisiones de combustibles fósiles desde la Revolución Industrial (IPCC, 2012).

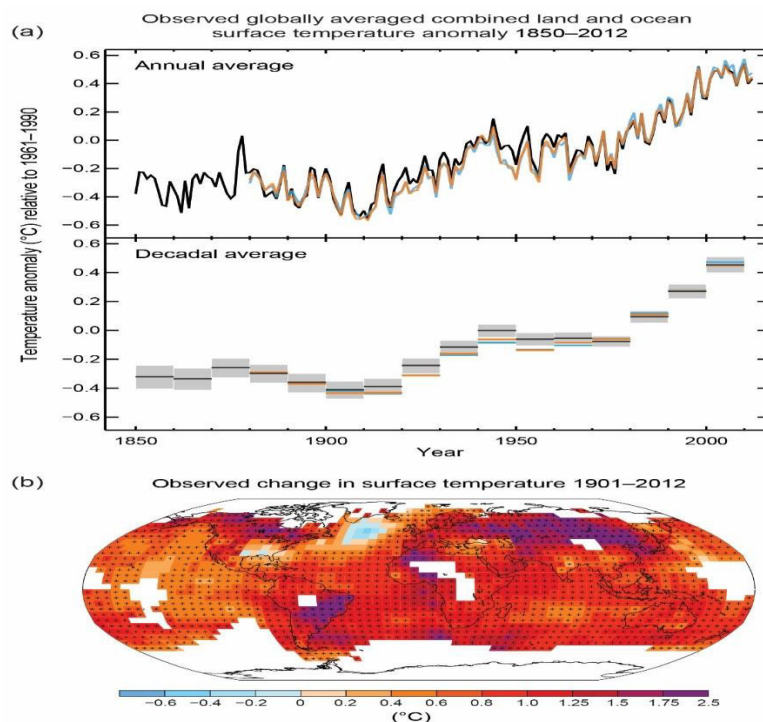


Figura 7. Variación de la temperatura en superficie global. Fuente: IPCC, 2013

El intervalo de confianza en la variación de las precipitaciones promedios sobre la superficie terrestre a nivel mundial desde 1901 es bajo, y medio a partir del 2010.

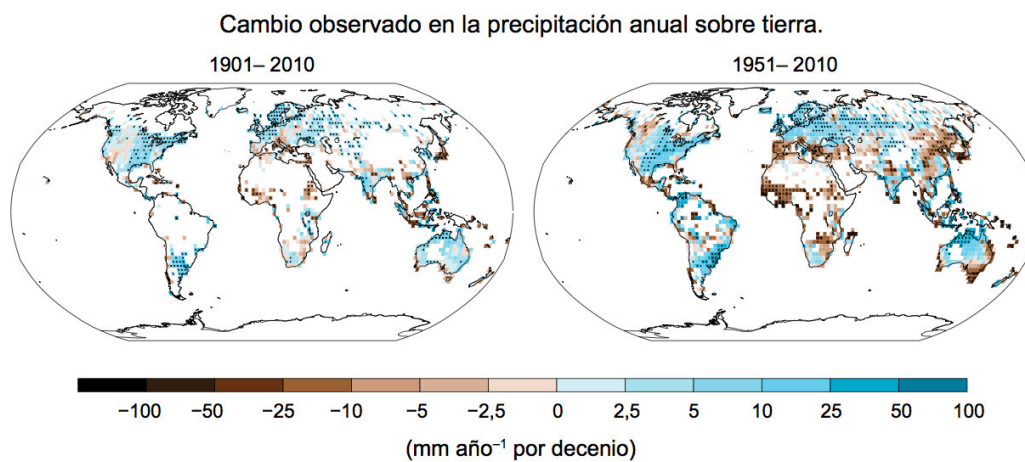


Figura 8. Variación de la precipitación anual sobre la superficie terrestre mundial. Representación gráfica de la variación de las precipitaciones, entre 1901-2010 y 1951-2010. Fuente: IPCC, 2013

2.4.5.2. Cambio Climático en Ecuador

El Ecuador, luego de la adopción en 1992 de la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático, a través del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), inició todo un proceso, para el conocimiento del cambio climático, sustentado en la realidad nacional la comprensión científica de la problemática, permitiendo definirla como áreas estratégicas en el contexto del cambio climático a la agricultura, los recursos hídricos, los bosques tropicales, las zonas marino-costeras, las zonas bajas propensas a inundaciones y las zonas con procesos de erosión.

De acuerdo a Cáceres (2011), Ecuador inició el denominado "Proceso del Cambio Climático" (PCCE) en el año 1993, con cuatro objetivos a largo plazo:

- Implementar una capacidad institucional básica para enfrentar la problemática del cambio climático.
- Analizar el cambio climático y sus posibles impactos en áreas estratégicas del país.
- Definir alternativas de respuestas ante el cambio climático para la toma de decisiones.
- Cumplir con los compromisos internacionales.

Ecuador representa el 0.2% de la población mundial, siendo responsable de un 0.1% de las emisiones de GEI a nivel mundial, con un promedio de emisión de 2.2 toneladas de CO₂ persona/año. Estos niveles están bastante por debajo de los de América Latina y el Caribe (PNUD y MAE, 2009).

En el país se han identificado cinco sectores especialmente vulnerables al cambio climático, estos son los sectores agropecuario, energético, forestal, de recursos hídricos y recursos marino costero. Considerando particularmente sensible el sector de recursos hídricos (PNUD y MAE, 2009).

2.4.5.3. Escenarios de Emisiones de Cambio Climático

En el año 1996 en reunión plenaria del IPCC se decidió desarrollar escenarios que representaran las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución,

por ello se solicitó un informe especial sobre escenarios de emisiones (*Special Report on Emissions Scenarios, SRES*). Dichos escenarios fueron publicados por el IPCC en el año 2001, siendo desde entonces ampliamente utilizados para modelar las emisiones futuras (IPCC, 2002). Los escenarios SRES están agrupados en cuatro familias denominadas A1, A2, B1 y B2, que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas originantes demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) resultantes. No contemplan otras políticas climáticas además de las existentes (IPCC, 2002).

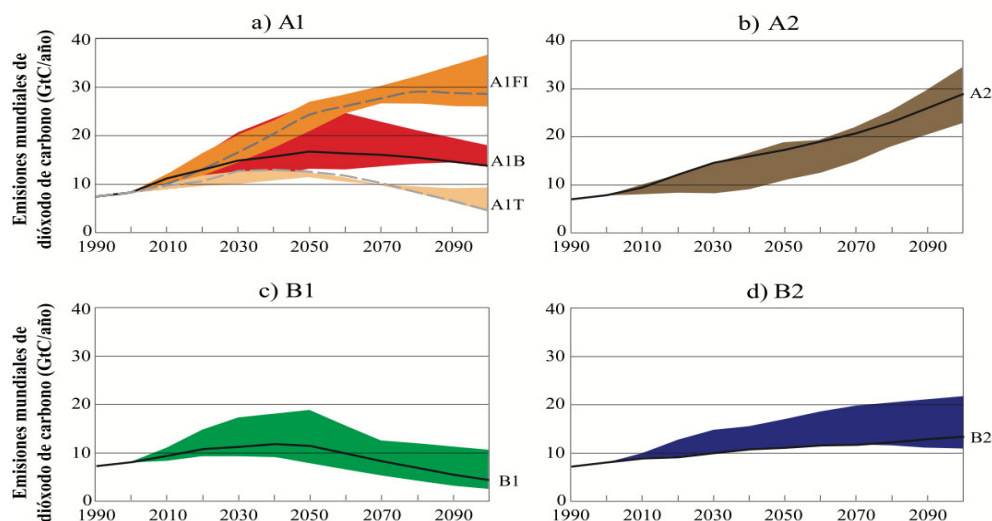


Figura 9. Emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial para escenarios SRES. Emisiones anuales totales de CO₂ provenientes de todas las fuentes (energía, industria y cambio de uso de las tierras) entre 1990 y 2100 (en gigatoneladas de carbono (GtC/año). Fuente: IPCC, 2002

2.4.5.4. Modelos Climáticos Globales “GCMs”

Se considera a los modelos climáticos globales instrumentos importantes en el estudio del cambio climático global (Fowler et al., 2007). Los GCMs son modelos matemáticos orientados a representar varios sistema de la tierra, entre éstos, la atmósfera y la superficie terrestre (Moradkhani, Baird, y Wherry, 2010).

Los GCMs son utilizados en simulaciones del clima actual y proyecciones futuras se utilizan generalmente para simular el clima actual y proyectar el clima (Dibike y Coulibaly, 2005).

Los modelos climáticos globales o numéricos son simuladores del sistema climático que tratan de representar al sistema climático de la manera más completa posible, mediante la resolución de las ecuaciones de las leyes y principios de la física que gobiernan los procesos en cada componente del sistema y los intercambios de energía y masa entre sí (Peixoto y Oort, 1992).

Dada la complejidad del sistema climático como los relacionados con las nubes, se utilizan técnicas estadísticas que incorporen éstos procesos a través de la "parametrización" (Peixoto y Oort, 1992). La cual sustituye procesos físicos por representaciones sencillas y muchas veces empíricas de los mismos, razón por la cual son típicamente la causa más importante de error en los modelos (Palmer y Williams, 2008).

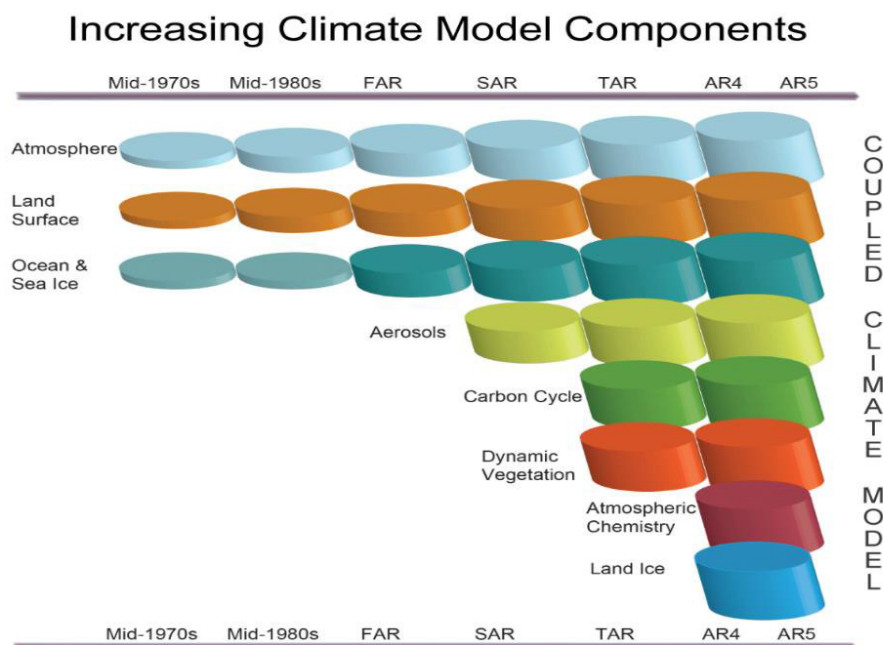


Figura 10. Evolución de los modelos climáticos globales e ilustración por cilindros de crecimiento. Fuente: IPCC, 2013

2.4.6. Curvas Guías de Operación

Existen diferentes reglas de operación en represas, todas indican el volumen del embalse o el caudal efluente que se pretende lograr en determinados períodos de tiempo; como el diario, decenal, semanal, mensual y anual.

Una de las reglas de operación más utilizadas incluye la división del volumen útil del embalse en diferentes “zonas” que poseen políticas de descargas específicas (Wurbs, 1996). Estas reglas de operación son llamadas curvas guía y usadas para indicar volúmenes o niveles del agua ideales del embalse en función de determinados objetivos.

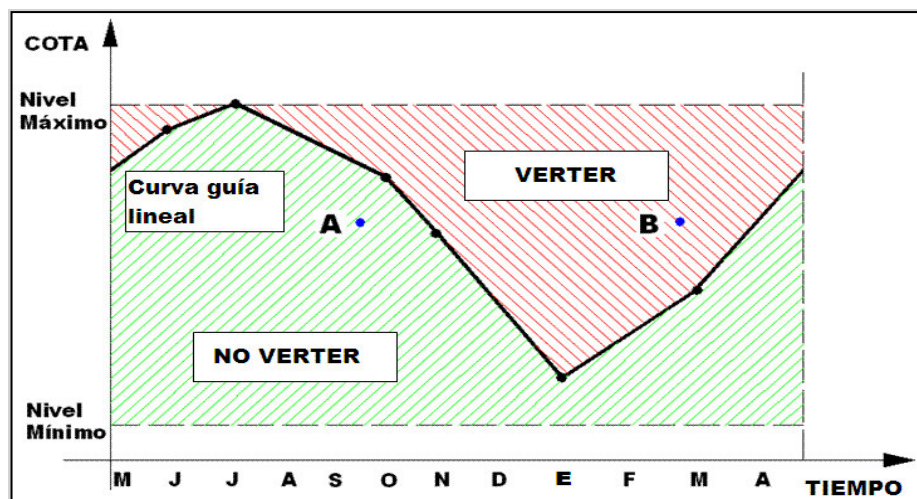


Figura 11. Ejemplo de curva guía para control de crecidas con volumen de espera variable durante el año. Fuente: Adaptado de Chen, 2007

2.4.6.1. Parametrización, Simulación y Optimización

La parametrización, simulación y optimización es una técnica que permite definir la operación óptima de una represa o de un sistema de represas utilizando un número reducido de variables de decisión.

En operación de represas, las curvas guía pueden ser representadas por segmentos de recta (parametrización), siendo las coordenadas de los extremos de esos segmentos las variables de decisión (Bravo *et al.*, 2006).

Las curvas guía así definidas son utilizadas por un modelo de simulación en la operación de una represa o de un sistema de represas. Finalmente, el modelo de simulación es acoplado a un modelo de optimización para definir las reglas de operación óptimas. De esta forma, la técnica de parametrización, simulación y optimización permite reducir el número de grados de libertad del sistema haciéndolo independiente del número de intervalos de tiempo considerados en la simulación (Bravo *et al.*, 2006).

Cuando es utilizada esta técnica para definir la operación óptima de una represa con diversos usos y múltiples curvas guía pueden ser parametrizadas para definir la operación de la represa (Chen, 2007). Tung *et al.*, (2003) y Chang *et al.*, (2005) utilizaron hasta tres curvas guía parametrizadas para definir zonas, dentro del volumen útil del embalse, que definían diferentes grados de racionamiento en la satisfacción de una demanda. La estrategia que permitió tener éxito en esos análisis fue considerar algunas variables de decisión comunes entre las diferentes curvas guía. De esa forma, a pesar de existir múltiples curvas guía, el número de variables de decisión permaneció reducido.

Bravo *et al.*, (2006) implementaron algoritmos evolutivos para el perfeccionamiento de las normas de operación en casos presentados previamente. Donde fue realizada una aplicación de la técnica de parametrización, simulación y optimización para definir la regla de operación de una represa con dos usos conflictivos: producción de energía y control de crecidas.

2.4.6.2. Curva Guía para Control de Crecidas y Volumen de Espera

Para atender esos dos objetivos, producción de energía y control de crecidas, el nivel del agua en el embalse es disminuido en el inicio y durante el período lluvioso, para permitir atenuar los caudales afluentes altos. En función de eso, ocurre una disminución de la producción energética, si comparada al escenario de maximización del nivel del agua en el embalse. El volumen creado en el embalse por el rebajamiento del nivel es denominado volumen de espera. Valores máximos de volúmenes de espera son necesarios en la

época de mayores precipitaciones y valores mínimos pueden ser adoptados durante los meses de poca lluvia. La curva definida por la relación entre el nivel del agua necesario para garantizar un determinado volumen de espera y la época del año es conocida como curva guía para control de crecidas. Esa curva representa una regla de operación simple para control de crecidas que puede ser definida como a seguir; si el nivel del agua en el embalse estuviera sobre el indicado por la curva guía es necesario verter hasta alcanzar nuevamente la curva guía; si estuviera debajo no es necesario verter (Bravo et al., 2006)

2.4.6.3. Modelación matemática en la operación de embalses

Recio, *et al.*, (2016) describen que el manejo y aprovechamiento de los recursos hídricos desde varios años se hace uso de modelos matemáticos basados en sistemas de optimización, dichas técnicas han sido implementadas con el fin de obtener lineamientos en la operación eficiente de embalses; modelos como redes neuronales artificiales, optimización de enjambre de partículas, programación lineal, no lineal y dinámica son los más aplicados para establecer guías de operación óptima.

2.4.6.4. Gráfico de despacho

El objetivo del gráfico de despacho es lograr el aprovechamiento y manejo óptimo del recurso hídrico de los embalses; es importante el uso de guías que muestren al operador las medidas a abordar a la hora de cumplir con la cuota planificada, estas guías están destinadas al manejo de los volúmenes de oferta y demanda que permita satisfacer las necesidades de los usuarios (Recio *et al.*, 2016).

2.4.6.5. Partes del gráfico de despacho

Zona de Entrega Garantizada: Se sitúa entre las líneas superior e inferior de entrega garantizada.

Zona de Entrega Aumentada: Se ubica entre la línea del (NAN) y la línea superior de la entrega garantizada.

Zona de Entrega Reducida: Se emplaza entre la línea inferior de entrega garantizada y la línea del volumen de aguas muertas.

Las líneas características principales son:

Línea del nivel de aguas normales (NAN).

Línea superior de entrega garantizada (LSEG).

Línea inferior de entrega garantizada (LIEG).

Línea del nivel de aguas muertas (NMTO).

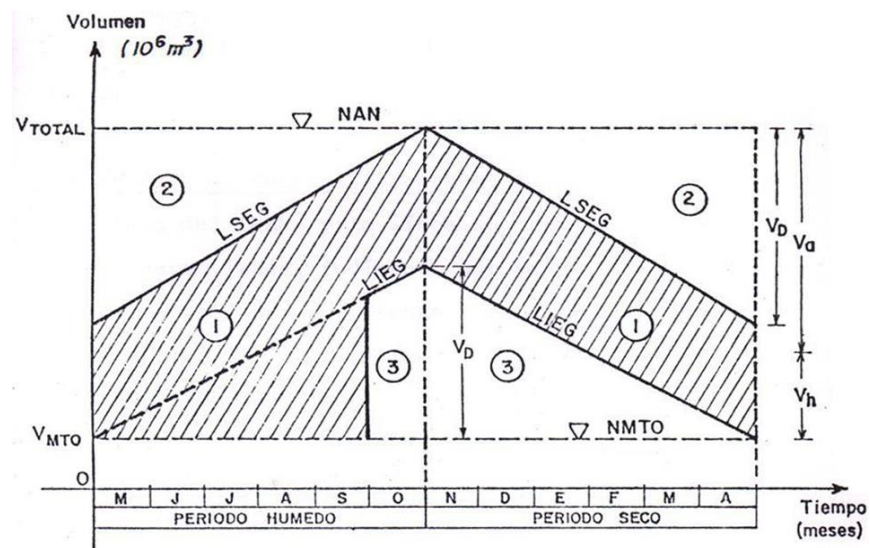


Figura 12. Ejemplo de gráfico de despacho. Fuente: Cabrera, 2019

2.4.6.6. Método Logarítmico Pearson Tipo III:

Con los datos de caudal medio y coeficiente de los valores observados se construye la curva teórica correspondiente: Para el coeficiente modular "k" se utiliza la tabla de coeficientes modulares (Cuadro 7) para probabilidad igual cero, k igual infinito; para probabilidad igual a cien, k igual a cero y para coeficiente de variación igual a cero, todos los k igual a uno.

Cuadro 7. Tabla de módulos de K de la distribución Pearson tipo III

Prob (%)	Cv=0.1	Cv=0.2	Cv=0.3	Cv=0.4	Cv=0.5	Cv=0.6	Cv=0.7	Cv=0.8
0,01	1,416	1,922	2,515	3,2	3,978	4,846	5,809	6,848
0,05	1,362	1,792	2,287	2,852	3,484	4,18	4,941	5,768
0,1	1,338	1,732	2,188	2,696	3,266	3,886	4,563	5,296
1	1,247	1,522	1,825	2,156	2,511	2,89	3,289	3,712
3	1,196	1,408	1,636	1,872	2,126	2,386	2,659	2,936
5	1,17	1,35	1,54	1,736	1,938	2,146	2,358	2,568
10	1,13	1,264	1,399	1,536	1,67	1,804	1,938	2,064
20	1,083	1,164	1,24	1,312	1,378	1,438	1,497	1,544
25	1,065	1,126	1,183	1,232	1,277	1,312	1,343	1,368
30	1,05	1,094	1,132	1,164	1,19	1,21	1,217	1,224
40	1,022	1,038	1,048	1,048	1,044	1,03	1,014	0,984
50	0,997	0,986	0,97	0,948	0,918	0,886	0,846	0,8
60	0,972	0,938	0,899	0,852	0,803	0,748	0,692	0,632
70	0,945	0,886	0,823	0,76	0,691	0,622	0,522	0,488
75	0,931	0,858	0,784	0,708	0,634	0,556	0,489	0,416
80	0,915	0,83	0,745	0,656	0,574	0,496	0,419	0,352
85	0,897	0,796	0,696	0,596	0,511	0,429	0,347	0,281
90	0,874	0,754	0,64	0,532	0,436	0,352	0,272	0,208
95	0,842	0,696	0,565	0,448	0,342	0,256	0,181	0,12
97	0,821	0,66	0,517	0,392	0,288	0,202	0,139	0,088
99	0,782	0,594	0,436	0,304	0,206	0,13	0,076	0,04
99,9	0,719	0,492	0,319	0,192	0,107	0,052	0,027	0,008

2.4.6.7. Parámetros estadísticos para el cálculo de la distribución empírica y coeficiente modular “k”

Media aritmética

$$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} \quad (2.7)$$

Desviación típica

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m)^2}{N-1}} \quad (2.8)$$

Varianza

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m)^2}{N-1} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i^2 - N Q_m^2}{N-1} \quad (2.9)$$

Coefficiente de variación

$$C_V = \frac{\sigma}{Q_m} C_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_i}{Q_m} - 1\right)^2}{N-1}} \quad (2.10)$$

Coefficiente de asimetría

$$C_S = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_m)^3}{N\sigma^3} \quad (2.12)$$

Donde:

Qi: Caudal específico.

N: Número de muestra.

Qm: Caudal medio.

σ : Desviación estándar.

Cv: Coeficiente de varianza.

Cs: Coeficiente de asimetría.

2.4.6.8. Regulación anual**Método estadístico de Kritski y Menkel**

El método estadístico de Kritski y Menkel se desarrolló en el año de 1935 destinado para el diseño de embalses, en el cual se describe la metodología para la determinación de la capacidad anual e hiperanual de un embalse (Recio 2016).

$$V_t = V_u + V_m \quad (2.13)$$

Donde:

Vt: Volumen total del embalse.

Vu: Volumen útil de almacenamiento del embalse.

V_m : Volumen muerto del embalse.

$$C_v = \sigma_t / W_m$$

$$\alpha = U / W_m$$

Donde:

σ_t : Desviación típica de la serie de escurrimientos.

W_m : Escurrimiento medio anual.

α : Grado de regulación del embalse.

U : Entrega anual bruta del embalse.

Regulación anual

Se busca compensar la carencia de escurrimiento que se vierte durante el año por la desigualdad de precipitaciones del periodo seco versus el periodo húmedo.

Datos como escurrimiento medio W_m , coeficiente de variación C_v , demanda anual D con su respectiva distribución mensual, son importantes en la regulación anual del sistema.

En el proceso para calcular el volumen útil se utiliza la ecuación de balance

$$V_i = V_{i-1} + W_i - R_i - P_i - VT_i \quad (2.14)$$

Donde:

V_i : Volumen del embalse al inicio del mes i .

V_{i-1} : Volumen del embalse al inicio del mes $i+1$ (fin del mes i).

W_i , R_i , P_i : Escurrimiento, Entrega y Pérdidas que ocurre durante el mes i respectivamente.

VT_i : Vertimientos de agua en el embalse durante el mes.

Establecidos los parámetros anteriores los resultados se verifican con la siguiente inecuación:

$$U_g \leq W_g \quad (2.15)$$

Dividiendo para el escurrimiento medio la inecuación anterior resulta:

$$\frac{U}{W_m} \leq \frac{W_g}{W_m} \quad \text{Por lo tanto, } \alpha \leq K_g$$

Donde:

W_g : Escurrimiento de cálculo garantizado.

K_g : Módulo de escurrimiento.

U_g : Entrega bruta garantizada.

U : Entrega anual bruta del embalse.

Regulación hiperanual

En busca compensar la carencia de escurrimiento, se realiza el cálculo del volumen a compensar para el déficit anual e hiperanual.

$$V_u = V_a + V_h \quad (2.16)$$

Donde:

V_a : Volumen anual del embalse.

V_h : Volumen hiperanual del embalse.

$$\beta_u = \beta_a + \beta_h \quad (2.17)$$

Donde:

β_u : Capacidad útil relativa.

β_a : Capacidad anual relativa.

β_h : Capacidad hiperanual relativa.

Cálculo de la componente anual para embalse hiperanual

Para el cálculo de la función hiperanual es indispensable el uso de los parámetros: Coeficiente de varianza, porcentaje de garantía y grados de regulación ; es decir β_h en función de C_v , g , α .

El coeficiente de variación se lo obtiene de la garantía (g) y la serie de escurrimiento, dato que varía dependiendo de la demanda.

Es importante la implementación de las tablas en la determinación de la componente hiperanual.

2.4.6.9. Análisis de sensibilidad

En el campo de la ingeniería y la ciencia es muy común el empleo de modelos matemáticos para resolver problemas, se considera como modelo matemático a un sistema conformado por algoritmos, donde se ingresan datos y se obtienen resultados, de los cuales se comprueba su validez mediante un análisis de sensibilidad (Boccardo, *et al.* 2016).

Según Requena y Segovia (2016), en un análisis de sensibilidad se evalúa los datos obtenidos del modelo con los reales observados y la teoría existente, estudiando el grado de afectación de cada parámetro en la incertidumbre del resultado.

2.4.6.10. Validación del modelo

De acuerdo a Moriasi *et al.*, (2007) para la evaluación de modelos, es importante el uso de métodos gráficos y estadísticos, los métodos gráficos sin embargo solo presentan un análisis visual de los datos simulados y reales, además de este tipo de análisis existen métodos estadísticos que se presentan a continuación:

Coeficiente de correlación de Pearson

Según Legates y McCabe (1999), el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2): refieren el nivel de colinealidad entre los valores simulados y reales. Por lo que el coeficiente de similitud que se

encuentra en un rango de -1 a 1 es un indicador del nivel de similitud lineal entre los datos reales y simulados, aunque estos métodos estadísticos son los más utilizados a la hora de evaluar modelos son demasiados sensibles al analizar valores extremos altos e insensibles a diferencias agregadas y ajustables entre los datos simulados y los reales.

Modelo de estadísticas de evaluación (índice de error)

Comúnmente para la evaluación de modelos se utilizan índices de error como: El error absoluto medio (MAE), el error cuadrático medio (MSE), la media raíz y el error cuadrado (RMSE). Estos índices son muy importantes porque describen errores en las unidades del sistema en estudio.

Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Nash y Sutcliffe (1970) indica que el método estadístico NSE determina la eficiencia y la magnitud relativa de la varianza residual comparados con la varianza de los datos observados, este método determina el grado de ajuste entre los datos observados y los simulados.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_i^{Sim} - (V_i^{Teo})^2)}{\sum_{i=1}^n (V_i^{Sim} - (V_i^{Prom})^2)} \quad (2.14)$$

Donde:

V_i^{Teo} : Volumen teórico.

V_i^{Sim} : Volumen simulado.

n: Número total de observaciones.

V_i^{Prom} : Volumen promedio.

Porcentaje de sesgo (PBIAS)

Éste método describe que los valores simulados tienden a ser mayores o más pequeños que su contraparte observada, el valor óptimo del PBIAS es 0.0; cuando los valores tienden a ser de baja magnitud, determinan que la

simulación del modelo es muy buena. Si los datos tienden a ser positivos existe un sesgo de subestimación del modelo (Gupta *et al.*, 1999).

$$PBIAS = \frac{\sum n(V_i^{Sim} - V_i^{Teo}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (V_i^{Sim})} \quad (2.15)$$

Donde:

V_i^{Teo} : Volumen teórico.

V_i^{Sim} : volumen simulado.

n: Número total de observaciones.

Relación de desviación estándar de observaciones RMSE (RSR):

Este método estadístico de índice de error es el más utilizado, de acuerdo a Legates y McCabe (1999) mientras menor sea RMSE el modelo analizado será de mayor eficiencia, para esto se calcula como la relación del RMSE y desviación estándar de los datos medidos.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{sim}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i^{Sim} - V_i^{Teo})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i^{Sim} - V_i^{Prom})^2} \right]} \quad (2.16)$$

Donde:

V_i^{Teo} : Volumen teórico.

V_i^{Sim} : Volumen simulado.

n: Número total de observaciones.

V_i^{Prom} : Volumen Promedio.

STDEV: Desviación estándar

RMSE: Error cuadrático medio.

En el siguiente cuadro se muestran los rangos pertinentes para la comprobación de la eficiencia de los modelos matemáticos.

Cuadro 8. Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación

PBIAS	NSE	RSR	Interpretación Modelo
$PBIAS < \pm 10$	$0,75 < NSE \leq 1,0$	$0.00 < RSR \leq 0.50$	Muy Bueno
$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$0.50 < RSR \leq 0.60$	Bueno
$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0,50 \leq NSE \leq 0,65$	$0.60 < RSR \leq 0.70$	Satisfactorio
$PBIAS \geq \pm 25$	$NSE < 0,50$	$RSR > 0.70$	No satisfactorio

Fuente: Moriasi *et al.*, 2007

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Diseño de Investigación

De acuerdo a la intervención del investigador la presente investigación es de tipo observacional ya que no se modifican las variables en estudio; se agregan las variables según la toma de los datos observados de las condiciones fisiográficas, constantes de anomalías meteorológicas, las cuales fueron ingresadas mediante ecuaciones matemáticas para la obtención de secuencias de curvas guías de operación en el lenguaje de programación.

Según la planificación de la toma de datos, la investigación es retrospectiva porque los datos requeridos para el estudio fueron recogidos de los históricos de las estaciones meteorológicas y de las entidades encargadas del manejo del embalse.

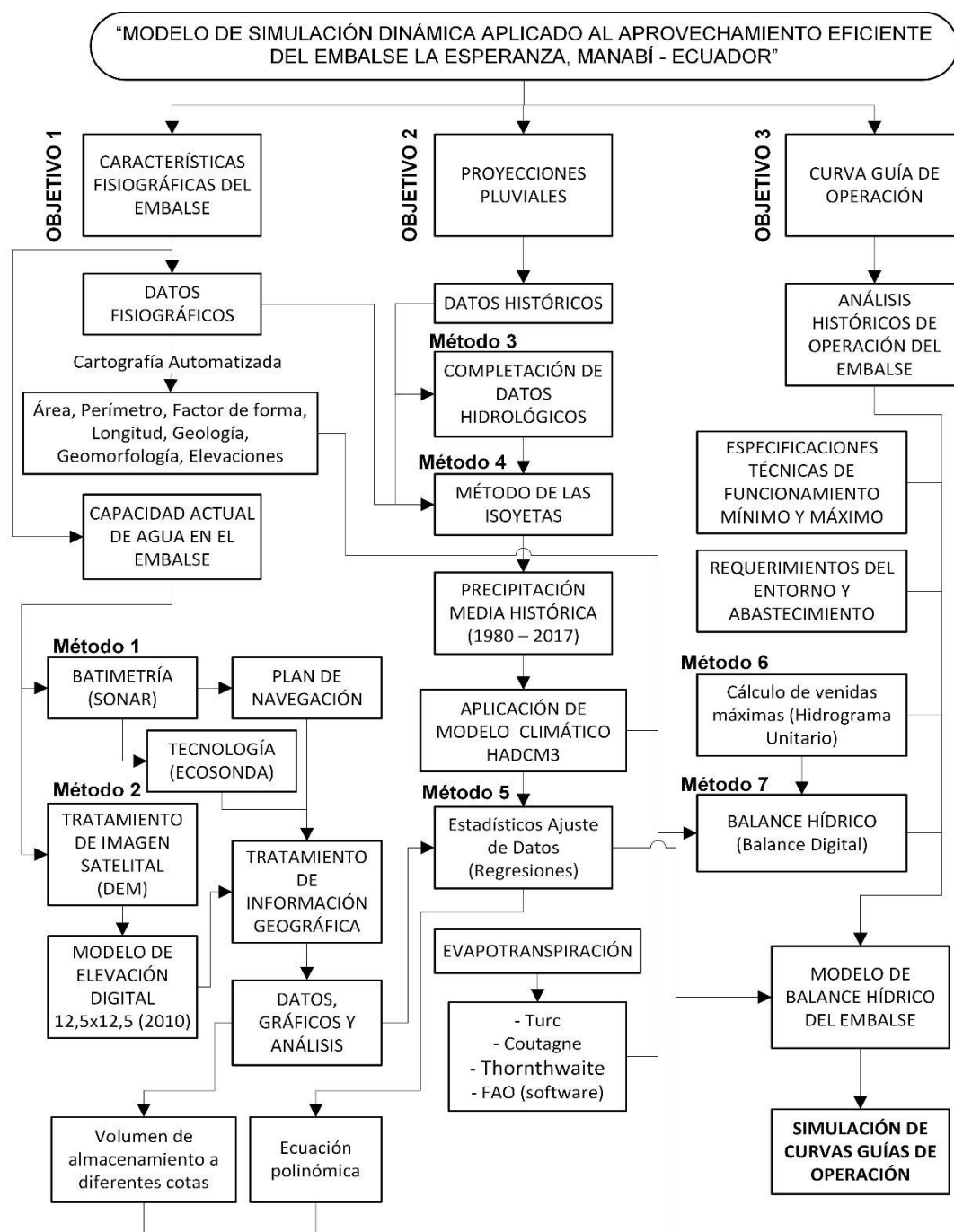
Acorde al número de mediciones de las variables, el estudio es longitudinal, ya que en la toma los datos históricos se realizaron múltiples mediciones en el tiempo de las entidades a cargo que fueron consultadas, además de las mediciones hechas en sitio, en la obtención de la información.

Conforme al número de variables de interés la investigación es analítica en cuanto a que, en el enunciado principal se empleó más de una variable. (Bi-variado), donde la variable independiente es el "Modelo de simulación dinámica" y la variable dependiente es el "Aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza".

Por lo tanto, se concluye que la presente investigación es de tipo: Observacional - Retrospectiva - Longitudinal - Analítica.

Para el diseño de la investigación se estableció un flujograma de procedimiento metodológico el cual se detalla a continuación:

3.2. Flujograma metodológico de la investigación



El método científico general de la presente investigación es el "Modelo de simulación" que pertenece al grupo de las ciencias; el cual consta en la página web "Tsauró de la UNESCO", basada en la teoría de los sistemas dinámicos (TSD).

El presente estudio utilizó información retrospectiva (data histórica), para obtener regresiones que permitieron a través de un balance hídrico digital obtener información prospectiva (proyección), de secuencias de curvas guías, bajo diferentes escenarios.

El proceso metodológico consta de tres partes, una por cada objetivo específico, por medio del cual se obtuvieron formulaciones matemáticas, que fueron introducirlas en el mapa de programación; proceso que se detalla a continuación en las siguientes fases:

- **FASE 1**

Se determinó las características fisiográficas del área en estudio mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG), con lo cual se elaboró mapas temáticos del área en estudio, datos relevantes y de importancia para actividades posteriores.

Se estableció el volumen actual de almacenamiento del embalse representada por medio de una ecuación polinómica de segundo grado, el cual permite obtener el volumen de almacenamiento en función de cota o nivel. Para cumplir con este propósito se utilizó el método batimétrico de posicionamiento 3D (sistema batimétrico ecosonográfico) y del tratamiento de un modelo de elevación digital "DEM" (imagen de resolución 12,5 m x 12,5 m), que es un método indirecto. Estos dos métodos se fusionaron mediante el tratamiento de información geográfica (utilizando el programa ArcGIS en su versión 10.4.1), juntándose las nubes de puntos geográficos de la batimetría y del perímetro circundante del embalse extraídos a través de la imagen DEM, eliminando el error de la teledetección por penetración en agua, mediante el procesamiento de coordenadas de nube puntos a redes irregulares de triángulos "TIN", se calcularon volúmenes de almacenamiento. Una vez aplicados los métodos, se obtuvo áreas del embalse a cada metro de altura, las cuales se introdujeron en el software Excel versión 2016 y aplicando el método de las regresiones se obtuvo ecuaciones polinómicas para volumen y área, en función de la cota del embalse.

- **FASE 2**

Para dar cumplimiento con el objetivo de las proyecciones pluviales se obtuvo en primer lugar el promedio histórico de las precipitaciones por cada mes del año de la zona en estudio, para lo cual se solicitaron datos oficiales de estaciones meteorológicas, llenado los vacíos mediante 3 métodos de complementación de datos pluviométricos (Promedios vecinales, Razones promedios y Regresión Lineal), a través del software ArcGIS 10.4.1 se aplicó el método de isoyetas; en segunda instancia se utilizó el modelo HadCM3 que contempla el informe de Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) 2013, por medio del cual se emplearon las constantes de anomalías para diferentes escenarios; estableciendo ecuaciones lineales de proyección pluviométricas mensuales, aplicando métodos estadísticos de ajuste de datos (regresiones) por medio del software Excel 2016, además se extrajeron datos de evapotranspiración, por medio del programa LocClain (FAO Local Climate Estimator) versión 1.0, así mismo se aplicaron las fórmulas de Turc, Coutagne y Thornthwaite; de los cuales se obtuvo los promedios de las evapotranspiraciones, para finalmente obtener un promedio general de evapotranspiración (mm/mes) de la cuenca aportante al embalse La Esperanza, llevándolo a unidad de caudal (m³/s) en el balance hídrico digital para la obtención de las curvas guías de operación del embalse.

- **FASE 3**

En esta etapa se extrajo varias curvas guías de operación en función del manejo histórico del embalse por medio del análisis estadístico de la data histórica de operación del embalse La Esperanza, haciendo uso del software Excel 2016, por el cual se obtuvo una curva guía referente.

Consecuentemente se realizó el cálculo de avenidas máximas mediante el método de hidrograma unitario, para posteriormente con parámetros definidos del uso y administración del reparto del embalse, aplicar el método de balance digital para embalses, acoplando todos los resultados en el software, desarrollando un modelo dinámico que asocia todos los resultados y gráfica de los niveles del embalse en varias condiciones proyectadas, personalizando

la hoja de cálculo con los debidas restricciones de funcionamiento de los sistemas acoplados al embalse, operación de la presa y características geográficas de la zona.

3.2.1. Descripción general de los métodos utilizados

- Método 1: Batimetría (Posicionamiento en 3D)

Las tecnologías de sonda en la actualidad son más sofisticadas para el ámbito de la navegación, ofreciendo una imagen de gran amplitud y de calidad, identificando estructuras, objetos sumergidos y peces con total nitidez, teniendo la capacidad de crear mapas de navegación de alta definición “HD” de contornos del fondo o lecho. Al igual que en levantamientos topográficos, la batimetría con sonar nos otorga una nube de puntos densa (Norte, Este y Profundidad), mediante pos-proceso transformar la profundidad en altura (m.s.n.m.); tarea que se obtiene con la cota del embalse en el momento de la toma de coordenadas.

El equipo utilizado fue una Ecosonda Garmin echoMAP™ CHIRP 72CV con las siguientes especificaciones técnicas:

- ✓ CHIRP (frecuencias baja, media y alta).
- ✓ Tradicional: 50/77/200 kHz.
- ✓ ClearVü: 260/455/800 kHz.
- ✓ Potencia de transmisión: 500 W (RMS)/4.000 W (pico a pico).
- ✓ Profundidad máxima: 700 m a 77 kHz en agua dulce.
- ✓ GPS interno de 5 Hz actualiza la posición y el rumbo 5 veces por segundo.

La batimetría se realizó en una lancha con motor mediante un plan de navegación de intervalo de 25 m., a una velocidad promedia de 10 km/h.

- Método 2: Tratamiento de Imágenes Satelitales (Método Indirecto)

El desarrollo de la teledetección se ha desarrollado en los últimos años, y se espera aún un crecimiento más acelerado. Existen numerosas aplicaciones basadas en el análisis de imágenes satelitales que abarcan campos científicos

muy variados. En la actualidad los problemas ambientales requieren que los estudios de campo con nuevas herramientas, permitan observar territorios. La teledetección es una herramienta que contribuye a entender lo concreto desde la globalidad.

Mediante el programa ArcGIS 10.4.1 se procesaron imágenes satelitales de alta resolución de uso libre para identificar el contorno de almacenamiento del embalse y con imágenes DEM se procedió a calcular la delimitación de la cuenca aportante y sus microcuencas en colaboración con la batimetría y cálculo de almacenamiento máximo del embalse. La imagen satelital fue descargada del satélite ALOS PALSAR (<https://www.asf.alaska.edu/>), con las siguientes especificaciones técnicas.

- ✓ Dataset: ALOS.
 - ✓ Granule: ALPSRP234717160.
 - ✓ Satellite: ALOS PALSAR.
 - ✓ Acquisition Date: 2010-06-21.
 - ✓ Beam mode: FBD.
 - ✓ Path: 112.
 - ✓ Frame: 7160.
 - ✓ Ascending/Descending: Ascending.
 - ✓ Polarization: HH+HV.
 - ✓ Off Nadir Angle: 34.3°.
 - ✓ Faraday rotation: 0.64°.
 - ✓ Absolute Orbit: 23471.
 - ✓ Frequency: L-Band.
 - ✓ Spatial resolution: 12,5 x 12,5.
- Método 3: Complementación de datos pluviométricos

En muchas estaciones meteorológicas hay periodos con vacíos en su base de datos, a causa de instrumentos o del observador. En el perímetro del área de estudio se encuentran una variedad de estaciones meteorológicas activas y no activas, pero con información histórica, las cuales se encuentran en zonas de diferentes índoles geomorfológicas como valles, sistemas montañosos y en

zonas tropicales pueden variar sus precipitaciones en ciertos casos radicalmente, por lo cual se trabajaron con 3 tipos de métodos para la complementación de datos.

Cuadro 9. Ecuaciones de complementación de datos pluviométricos utilizadas

Método de completación de datos pluviométricos	Ecuaciones	Descripción
Promedios vecinales* (Luna y Lavado, 2015)	$PX = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{n}$ (3.1)	Pi= es la precipitación de las estaciones. n= es el número de estaciones
Razones promedios** (Luna y Lavado, 2015)	$PX = \frac{\overline{PX}}{N} \times \left(\frac{PA}{\overline{PA}} + \frac{PB}{\overline{PB}} + \dots + \frac{PN}{\overline{PN}} \right)$ (3.2)	$\overline{PA}, \overline{PB}, \overline{PN}, \overline{PX}$ son el promedio de las precipitaciones anuales registradas en un período común. PA, PB, PN, PX= es la precipitación de las estaciones. N= es el número de estaciones.
Regresión Lineal *** (Luna y Lavado, 2015)	$y = a + bx$ (3.3)	y= es la precipitación estimada. x= es la precipitación de la estación patrón. a, b= son las constantes de la regresión lineal.

* Para estaciones en zonas planas con dos o más estaciones alrededor

** Para estaciones en zonas montañosas con dos o más estaciones alrededor

*** Para estaciones con solo una estación cercana

Para aplicar estos métodos se utilizó el coeficiente de correlación con las estaciones a completar que entraban en el análisis, los que contaban con un índice entre el 70 % y 100%; en el caso menor al 70%, no entraba al análisis de completación.

- Método 4: De las Isoyetas

El método de las isoyetas determina las líneas de igual altura de precipitación, calculando el área entre Isoyetas y determinando así la precipitación caída entre ellas.

El cálculo de la precipitación media determina el área delimitada por dos isoyetas, que se usa como elemento de ponderación, mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i * A_i}{\sum A_i} \quad (3.4)$$

Donde:

\bar{P} : Precipitación media del área en estudio.

P_i : Precipitación entre isoyetas.

A_i : Área de precipitación entre isoyetas.

- Método 5: Estadísticos Ajuste de Datos (Regresiones)

La Regresión consiste en la creación de una fórmula matemática que relacione variables, a lo que se denomina función matemática.

Una función matemática de dos variables: $y=f(x)$ (3.5)

Siendo la ecuación 3.5 la representación (la modelización) matemática de una relación entre las dos variables: “x” e “y”. A la variable en la posición de la “y” se la denomina dependiente. A la variable en la posición de la “x” se la denomina independiente.

- Método 6: Método del hidrograma unitario

Se denominan diagrama unitario a aquel hidrograma que resulta del escurrimiento de un volumen unitario. En la práctica se conoce varios tipos de hidrograma unitario, en el presente se aplicó la del SCS (Soil Conservation Service USA, actualmente NRCS), el cual es el utilizado en estudios hidrológicos, en análisis de cuencas pequeñas y grandes. El hidrograma real se obtiene a partir del hidrograma unitario en correlación con los datos específicos de lluvias efectivas.

Secuencia de cálculos:

- Elaboración del hidrograma unitario

- Tiempo de concentración (h) (Kirpich): $T_C = 0,000325 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$ (3.6)

- Tiempo de retardo (h): $T_r = 0,6 T_C$ (3.7)

$$\text{- Duración de la lluvia (h):} \quad d_e = 2\sqrt{T_C} \quad (3.8)$$

$$\text{- Tiempo pico (h):} \quad T_p = \frac{d_e}{2} + T_r \quad (3.9)$$

$$\text{- Tiempo base (h):} \quad T_b = \frac{8}{3} T_p \quad (3.10)$$

$$\text{- Caudal pico (m}^3\text{/s/mm):} \quad Q_p = 0,208 \frac{A_c}{T_p} \quad (3.11)$$

Donde:

L: Longitud del río principal (m).

$$S: \text{Pendiente media del cauce principal (m/m)} \quad S = \frac{\Delta \text{alturas del lechos}}{L} \quad (3.12)$$

A_c : Área de la cuenca (km^2).

b) Determinación de la lluvia efectiva

$$\text{- Escorrentía Superficial (mm):} \quad Q_e = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \quad (3.13)$$

Donde:

P= Precipitación (mm).

$$S= \text{Diferencia potencial máxima ente P y Q , (mm):} \quad S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3.14)$$

CN= Número de curva.

c) Elaboración del hidrograma efectivo

Se obtiene mediante la relación de las coordenadas del hidrograma unitario datos calculados de tiempo pico y caudales.

d) Determinación del caudal máximo

Se determina mediante la ayuda del hidrograma de lluvia dada.

• Método 7: Método de balance digital

Según Campos *et al.*, (2016) este método presenta la estimación de los volúmenes de un embalse, para efectos del mismo se debe contar los siguientes requisitos:

- a) Caudales medios mensuales del río, mismos que deben incluir datos pertenecientes a los años secos, $\text{m}^3\text{/s}$.
- b) Nivel de agua normal, el cual corresponde al volumen total del embalse.

- c) Datos para la elaboración de la curva de capacidad (Volumen).
- d) Pérdida de agua por evaporación Q_{evap} m³/s.
- e) Pérdida de agua por filtración Q_{filt} m³/s.

Se utilizaron las siguientes formulas:

$$\text{Total, de caudal por pérdidas y ecológico: } \sum Q_p = Q_{filt} + Q_{evap} + Q_{ec} \quad (3.15)$$

$$\text{Caudal demandado: } Q_{dis} = Q - \sum Q_p \quad (3.16)$$

$$\text{Caudal a regular } Q_{reg} = \frac{\sum Q_{dis}}{12} \quad (3.17)$$

$$\text{Déficit/exceso de caudal: } \Delta Q = Q_{dis} - Q_{reg} \text{ [+exceso; - déficit]} \quad (3.18)$$

(Debe cumplir la siguiente condición $\sum Q = 0$)

$$\text{Volumen: } \Delta V = \Delta Q * t, \text{ donde } t=2,63*10^6\text{s} \quad (3.19)$$

Volumen del embalse al finalizar el mes V_{fin} se suma secuencialmente ΔV

$$\text{Volumen útil de embalse } V_{util} = |V_{max\ fin}| + |V_{min\ fin}| \quad (3.20)$$

Niveles principales de embalses

Siglas	Descripción
<i>NAN</i>	<i>Nivel de aguas normales</i>
<i>NVM</i>	<i>Nivel de volumen muerto</i>
<i>NE</i>	<i>Nivel de embalse</i>
<i>NF</i>	<i>Nivel de fondo</i>

(Campos *et al.*, 2016)

Cuadro 10. Regulación de embalse

Mes	Caudal medio mensual	Perdidas		Caudal Ecológico	ΣQ <i>perd. + ec.</i>	Q <i>disp.</i>	Q <i>reg.</i>	ΔQ	V [m³]		V <i>fin</i>
	Q	Q <i>filtr.</i>	Q <i>evap.</i>	Q <i>ec.</i>					+	-	
	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s					m³/s	m³/s	
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
I											
II											
III											
IV											
V											
VI											
VII											
VIII											
IX											
X											
XI											
XII											
					Σ					MAX +	
					Q <i>reg.</i>					MAX -	
										V =	

$$[6] = [3] + [4] + [5]$$

$$[7] = [2] - [6]$$

$$[9] = [7] - [8]$$

$$[10] = [9] * 2,63 * 10^6 \text{ (VALORES POSITIVOS)}$$

$$[11] = [9] * 2,63 * 10^6 \text{ (VALORES NEGATIVOS)}$$

$$[12] = [10] y [11]$$

Fuente. (Campos *et al.*, 2016)

3.3. Unidad de Análisis

La presente investigación tuvo como unidad de análisis principal el "Embalse La Esperanza" (Anexo 1, Anexo 2, Figura 13), mediante el cual se obtuvo un modelo de simulación para el aprovechamiento eficiente en el tiempo.

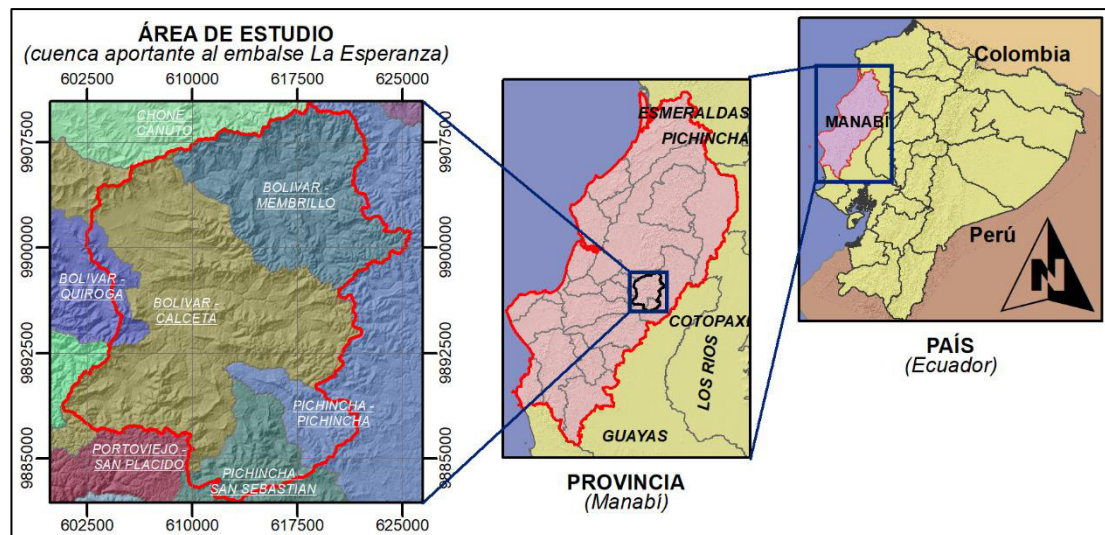


Figura 13. Ubicación del área de estudio

3.4. Técnicas de Recolección de Datos

La recolección de datos de la investigación se realizó aplicando las técnicas de entrevistas, análisis documental y observación *in situ*, en el cual se obtuvo los datos históricos de precipitaciones pluviales de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, y toda la información de la operación de la presa por parte de la entidad encargada de su manejo, desde el inicio de operación hasta el momento actual; con el cual se resolvieron algunos problemas específicos que nos llevó a componer un modelo de simulación dinámica.

3.5. Análisis e Interpretación de la Información

La data histórica fue analizada a través de estadísticos descriptivos en función a los objetivos específicos en función de las condiciones superficiales y proyecciones meteorológicas en la obtención de la secuencia de las curvas guías de operación deduciendo ecuaciones matemáticas a través de regresiones que fueron incorporadas en lenguaje de programación Microsoft Excel 2016, mediante el cual se realizaron múltiples simulaciones en la búsqueda de la curva guía de operación óptima, en periodos de meses, obteniendo tablas y gráficos de fácil interpretación.

Se utilizaron las tecnologías de recolección geográfica, para obtener la batimetría del embalse, información que permitió establecer, el volumen real actual del embalse, resultando ecuaciones polinómicas en función de cota-volumen y viceversa, con las cuales deducimos información numérica de la secuencia de curva guía acoplado al balance hídrico digital.

3.6. Gráfico de despacho

Para la elaboración del gráfico de despacho Cabrera (2007) se basó en el método estadístico de Kritski y Menkel (1935), el cual consiste en un balance por periodos (seco y húmedo) anual continuo.

Durante el proceso primero se realizó una revisión de la entrega garantizada teniendo como:

Datos hidrológicos:

Escurrimiento medio ($W_m \text{ Hm}^3$): 284,44

Coeficiente de variación (C_v): 0,48

$W_{75} \text{ Hm}^3 = 184,54$

Garantía: 85%

Volúmenes característicos: Capacidad (hm^3)

Volumen Total (NAN)	$V_t = 340,23$
Volumen Muerto (NM)	$V_m = 22,18$
Volumen Máximo (NAM)	$V_{\text{máx}} = 436,98$
Volumen Útil	$V_u = 318,05$

Características por periodos

Periodo húmedo (enero-abril):

Escurrimiento medio, periodo húmedo: $W_m, H. = 190,44 \text{ hm}^3$

Coeficiente de variación, periodo húmedo: $C_v, H. = 0,38$

Periodo seco (mayo-diciembre):

Escorrimento medio, periodo seco: W_m , S. = 94,00 hm³

Coeficiente de variación, periodo seco: C_v , S = 0,92

Distribuciones típicas del escurrimiento en %

Porcentaje de escurrimiento medio, periodo seco: % W_m , S. = 33.05 %

Porcentaje de escurrimiento medio, periodo húmedo: % W_m , H. = 66.95 %

Gráfico de la relación entre α y β_U :

$$\beta_U = \frac{V_U}{W_m} \quad (3.21)$$

Donde:

β_u : Capacidad relativa útil.

V_u : Volumen útil.

W_m : Escorrimento medio.

Para la obtención de α se obtuvo de la relación entre α y β_U

Entrega garantizada

$$U = \alpha * W_m \quad (3.22)$$

$$R = U - P_t \quad (3.23)$$

Donde:

U : Entrega bruta.

α : Grado de regulación del embalse.

W_m : Escorrimento medio.

R : Entrega neta.

Pt: Pérdidas totales en el año.

Cálculo de los parámetros del escurrimiento y la entrega por períodos.

$$W_C^H = W_{85}^H + (W_m^H - W_{85}^H) \frac{U - (W_{85}^H + W_{85}^S)}{W_m - (W_{85}^H + W_{85}^S)} \quad (3.24)$$

$$W_{85}^H = K_{85}^H \cdot W_m^H \quad (3.25)$$

$$W_{85}^S = K_{85}^S \cdot W_m^S \quad (3.26)$$

$$W_C^S = U - W_C^H \quad (3.27)$$

$$W_C = W_C^S + W_C^H \quad (3.28)$$

Donde:

W_C^H = Escurrimiento medio húmedo.

W_m^S = Escurrimiento medio seco.

W_{85}^H = Escurrimiento medio húmedo 85%.

W_m^H = Escurrimiento medio húmedo.

W_{85}^S = Escurrimiento medio seco 85%.

W_m = Escurrimiento medio.

K_{85}^S = Coeficiente modular Pearson, periodo seco 85%.

K_{85}^H = Coeficiente modular Pearson, periodo húmedo 85%.

W_C = Escurrimiento de cálculos.

W_C^S = Escurrimiento de cálculo seco.

W_C^H = Escurrimiento de cálculo húmedo.

U = Entrega bruta.

Cálculo del vaciado admisible (VD).

$$V_D = W_C^H - U^H \quad (3.29)$$

Donde:

V_D = Vaciado admisible.

W_C^H : Ecurrimiento de cálculo para el PH.

U^H : Entrega bruta del periodo húmedo.

Distribución mensual del escurrimiento de cálculo

$$W_C = W_C^H + W_C^S = U \quad (3.30)$$

Determinación de la LSEG

$$V_K = V_t - V_D \quad (3.29)$$

Donde:

V_K : Llenado de embalse.

V_t : Volumen total.

V_D : Vaciado admisible.

3.7. Procedimientos realizados

Los procedimientos realizados en la investigación se dividieron en 3 partes, una por cada cada objetivo específico, las cuales se desglosaron en las siguientes fases:

Fase 1. Determinación las características fisiográficas actuales de la cuenca aportante al embalse La Esperanza:

- Ejecución batimétrica utilizando ecosonda (echoMAP™ CHIRP 72cv) y acoplamiento de datos a nivel de espejo del agua.

- Descarga de Modelo Digital de Elevación (DEM) del área de la cuenca aportante al embalse La Esperanza, obtenida del satélite Alos Palsar con resolución de 12,5 x 12,5 m.
- Reconfiguración del DEM de la cuenca, remplazando las coordenadas del área del embalse en el DEM descargado por la nube de coordenadas geográficas (x,y,z) obtenidas mediante la batimetría.
- Cálculo del volumen de almacenamiento actual a diferentes cotas. La operación se llevó a cabo en el software ArcMap 10.4.1, mediante la utilización de la herramienta volumen de polígono, alojado en análisis de herramientas 3D de la caja de herramientas.
- Delimitación de cuenca y microcuencas aportante al embalse La Esperanza. Se llevó a cabo mediante el programa Global Mapper 18, ArcMap 10.4.1 y CivilCAD 2018.
- Cálculo de las características superficiales de la cuenca, con la ayuda de los programas ArcMap 10.4.1 y Excel 2016.
- Elaboración de mapas temáticos, mediante información de capas “shapefiles” actuales del sistema nacional de información del Ecuador, utilizando el programa ArcMap 10.4.1.
- Análisis histórico mensual de volúmenes y caudales a la ciudad de Calceta y represa La Esperanza, identificando las áreas de aporte respectivas.

Fase 2. Elaboración de proyecciones pluviales del área en estudio mediante la aplicación de las constantes de anomalía de precipitaciones del cuarto informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC):

- Identificación estaciones meteorológicas en la zona de influencia de la cuenca aportante.
- Análisis de la información oficial histórica existente hasta la actualidad de las estaciones identificadas y solicitada al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).
- Completación de los datos faltantes o vacíos en los datos hidrológicos.
- Elaboración mensual de isoyetas en el programa ArcMap 10.4.1.
- Cálculo de precipitación media por cada Isoyeta.

- Aplicación del modelo climático HadCM3 en precipitaciones y temperatura.
- Simplificación de resultados en fórmulas de aplicación.
- Cálculo de evapotranspiración.
- Estimación de recarga hídrica.

Fase 3. Extracción de curvas guías de operación a través de un balance digital en la regulación del volumen del embalse La Esperanza:

- Análisis y simplificación de funcionamiento histórico del embalse La Esperanza.
- Identificación del patrón de curva guía según datos históricos analizados.
- Análisis histórico de vertidos al río Carrizal.
- Recopilación de datos relevantes en la administración y funcionamiento de la presa.
- Cálculo de venidas máximas.
- Esquematización del balance hídrico aplicado al embalse La Esperanza.
- Simulación del balance hídrico en el programa Microsoft Excel 2010.
- Gráfico de despacho: Método estadístico de Kritski y Menkel.
- Análisis de sensibilidad.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.1.1. Características superficiales de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.

4.1.1.1. Características superficiales

Los resultados se muestran secuencialmente en los posteriores cuadros, figuras y anexos de los mapas temáticos.

Cuadro 11. Geometría superficial de la cuenca aportante al embalse La Esperanza

Microcuencas aportantes al embalse La Esperanza						
Descripción	Área (A)	Tamaño	Perímetro (P)	Longitud (Lc)	Coeficiente de compacidad (Kc)	Coeficiente de forma (Kf)
	Km ²		Km	Km		
Carrizal	171,84	Pequeña	69,09	16,09	1,49	0,66
Membrillo	150,25	Pequeña	64,77	17,43	1,49	0,49
Bejuco	58,2	Pequeña	43,68	14,19	1,62	0,29
Cañas	23,93	Muy pequeña	24,02	9,82	1,39	0,25
Cuenca aportante	428,50	Intermedia Pequeña	111,72	25,04	1,52	0,76

Con la información sobre la clasificación de las cuencas de acuerdo a su tamaño (Cuadro 2), se procedió a realizar el (Cuadro 11) con lo que se determinó que la extensión geográfica de 428,50 km² de la cuenca aportante al embalse La Esperanza, que se encasilla como una cuenca intermedia pequeña; así también se presentan las características geométricas superficiales de las microcuencas aportantes como son el Carrizal, Membrillo, Bejuco y Cañas.

La cuenca en estudio es de forma oval oblonga y su índice de compacidad de 1,52 lo hace susceptible a tendencias de baja a medias crecientes (Cuadro 3). Además, aplicando el criterio de Villamizar (1989) (Cuadro 1), el embalse La Esperanza se sitúa en el rango de embalses medianos con un volumen de 428,64 Mm³ a la cota 66 m.s.n.m. (Cuadro 15) del nivel máximo de operacional (Figura 27).

Cuadro 12. Coordenada del centroide de la cuenca aportante al embalse La Esperanza

Centroide del área de estudio		
Coordenadas proyectadas UTM WGS84 Zona 17M	Este (X)	613120,7946 m
	Norte (Y)	9896388,5898 m
Coordenadas geográficas Grados decimales	Longitud	-79,9833°
	Latitud	-0,9372°

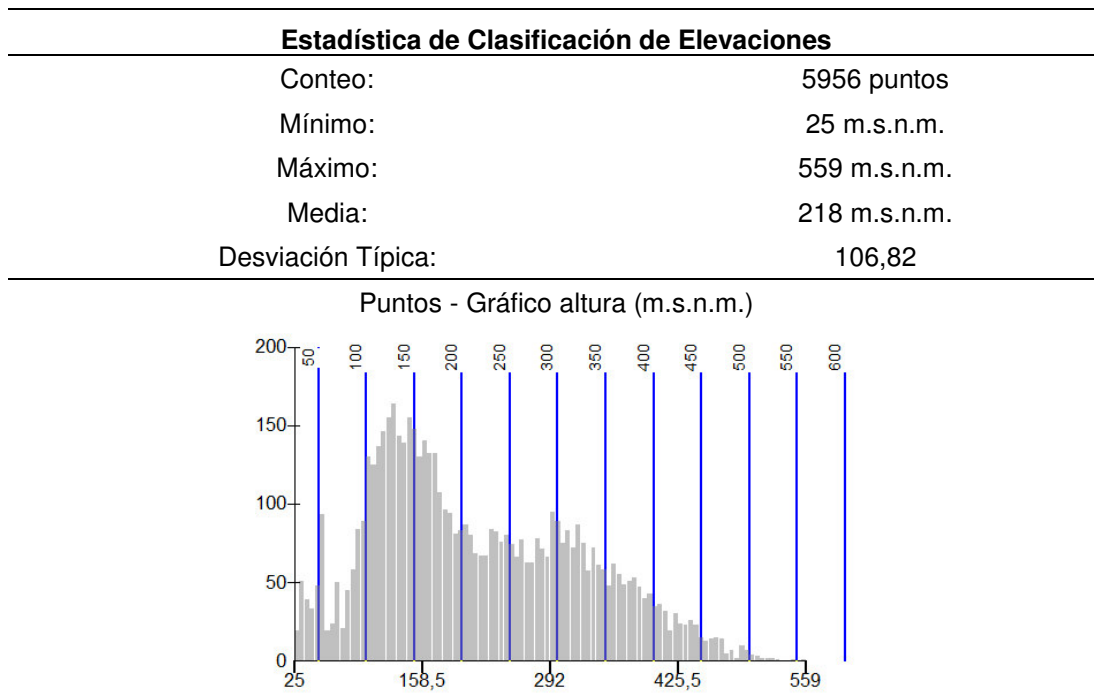
Cuadro 13. Datos de geomorfológicos del área de estudio

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	ÁREA	
		Km ²	%
Fv	Terraza aluvial	1,53	0,36
C2	Colinas medianas	79,86	18,64
Me1	Mesas disectadas	46,90	10,95
Vr	Vertientes regulares	137,67	32,13
Me2	Mesas muy disectadas	138,94	32,42
G-Ve	Gargantas de valles encañonados	13,51	3,15
C3	Colinas altas	1,17	0,27
Wn	Cuerpos de agua (cota 43-44 m.s.n.m)	8,92	2,08
Total		428,50	100

En la cuenca aportante al embalse La Esperanza existe siete tipos de geomorfologías (Anexo 4.3), tomando en cuenta el eje del curso principal del río en tendencia expandible, se pueden encontrar: terrazas aluviales, colinas medianas, mesas disectadas, vertientes regulares, mesas muy disectadas, gargantas de valles encañonados y colinas altas. De estos tipos de geomorfologías las mayores en extensión son las vertientes regulares y las

mesas muy disectadas que corresponden al 64,55% de la superficie total de la cuenca.

Cuadro 14. Datos de elevaciones del área de estudio



La cantidad de puntos de coordenadas (Cuadro 14) del área en estudio (Anexo 4.4), su mayoría están en el rango de los 90 y 200 m.s.n.m.

4.1.1.2. Almacenamiento actual del embalse

Esta actividad se llevó a cabo mediante el software ArcGIS 10.4.1 aplicación ArcMap, utilizando la función volumen de polígono ubicado en la opción terreno y TIN de superficie dentro la herramienta 3D Análisis, para lo cual se requirió el polígono del área y el archivo TIN de la cuenca en estudio, del cual se extrajeron los volúmenes y áreas a los niveles intermedios del embalse a cada metro, plasmándolo en el Cuadro 15, con un volumen máximo operacional de 428,64 hm³ a la cota 66 m.s.n.m. que al confrontándolo con el volumen inicial de construcción a la misma cota: 455 hm³ (Cuadro 31), se deduce un azolvamiento de 5,79% en el periodo 1997-2018, desde el inicio de su funcionamiento.

Cuadro 15. Volumen y superficie del embalse La Esperanza año 2018

COTA m.s.n.m.	VOLUMEN		ÁREA	
	m ³	hm ³ (Mm ³)	m ²	ha
67,5	461387221,29	461,39	24000853,76	2400,09
67	450409924,45	450,41	23830108,75	2383,01
66	428638048,95	428,64	23485532,60	2348,55
65	407079557,77	407,08	23178693,98	2317,87
64	385704143,98	385,70	22867771,35	2286,78
63	364514776,44	364,51	22553380,04	2255,34
62	343513613,34	343,51	22236665,52	2223,67
61	322702109,65	322,70	21917737,81	2191,77
60	302082206,69	302,08	21518582,26	2151,86
59	281805032,88	281,81	21054968,64	2105,50
58	261871130,45	261,87	20582482,16	2058,25
57	242318192,34	242,32	20046649,47	2004,66
56	223240928,51	223,24	18630365,58	1863,04
55	205922406,01	205,92	16715023,47	1671,50
54	190273327,83	190,27	15341684,11	1534,17
53	175834768,20	175,83	14321472,54	1432,15
52	162332702,31	162,33	13538484,11	1353,85
51	149571547,74	149,57	12823181,48	1282,32
50	137451221,45	137,45	12218399,63	1221,84
49	125885150,65	125,89	11635312,10	1163,53
48	114845359,88	114,85	11083088,64	1108,31
47	104313053,10	104,31	10574096,24	1057,41
46	94258992,93	94,26	10100633,94	1010,06
45	84655122,01	84,66	9621728,14	962,17
44	75495766,18	75,50	9154330,73	915,43
43	66770118,46	66,77	8719099,46	871,91
42	58456686,86	58,46	8267502,52	826,75
41	50596945,89	50,60	7731735,41	773,17
40	43243294,16	43,24	7223028,21	722,30
39	36392211,02	36,39	6712073,92	671,21
38	30051106,10	30,05	6147859,94	614,79
37	24256189,52	24,26	5582904,70	558,29
36	19011505,17	19,01	5009796,67	500,98
35	14361793,58	14,36	4359887,77	435,99
34	10335652,44	10,34	3675185,55	367,52
33	6989923,19	6,99	2955640,40	295,56
32	4351748,99	4,35	2283491,14	228,35
31	2350644,11	2,35	1673391,12	167,34
30	958852,91	0,96	953554,93	95,36
29	293460,03	0,29	323203,22	32,32
28	75890,19	0,08	117568,83	11,76
27	239,59	0,00	731,29	0,07

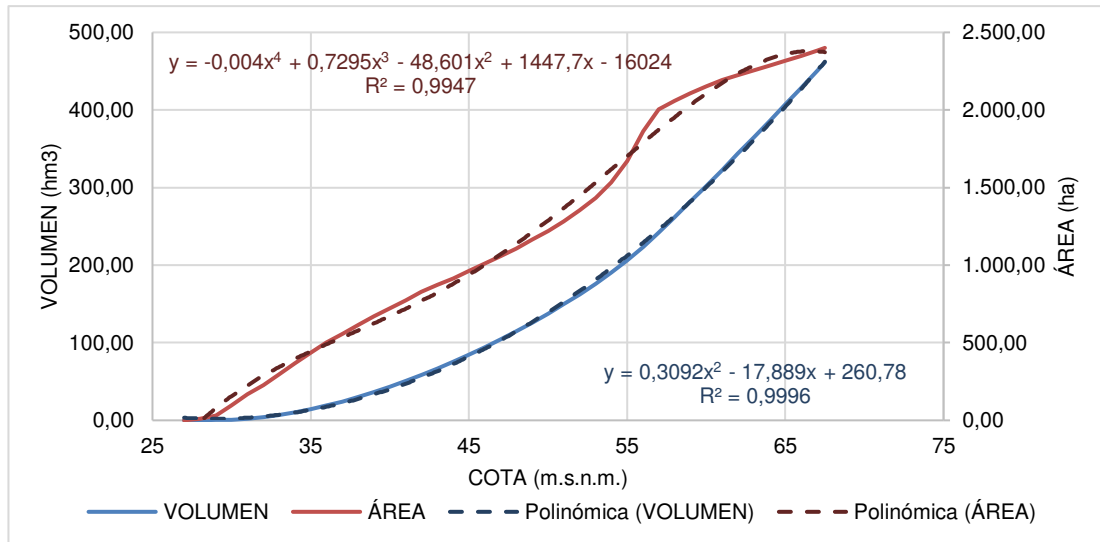


Figura 14. Volumen y Superficie del Embalse La Esperanza.

Utilizando los niveles de cotas y volumen de agua en los puntos representativos se consiguió la ecuación de segundo grado para la modelación del volumen actual del embalse, la ordenada “y” representa el volumen del embalse, en función de la abscisa “x” referida a la cota.

$$V = 0,3092c^2 - 17,889c + 260,78 \quad (\text{Figura 14}) \quad (4.1)$$

$$c = -0,0001 V^2 + 0,1148 V + 35,557 \quad (4.2)$$

Donde:

V = Volumen del embalse (hm³).

c = Cota del embalse (m.s.n.m.).

De la misma manera utilizando los niveles de cotas y áreas de la lámina del embalse en los puntos representativos se consiguió la ecuación de cuarto grado para la modelación de la superficie actual del embalse.

$$S = -0,004 c^4 + 0,7295 c^3 - 48,601 c^2 + 1447,7 c - 16024 \quad (4.3)$$

Donde:

S = Superficie del embalse (ha)

c = Cotas del embalse (m.s.n.m.)

4.1.1.3. Análisis de áreas de aporte "Estación Calceta - Presa La Esperanza"

En el análisis histórico de los caudales que pasaban en la estación limnimétrica de la Ciudad de Calceta y los que llegaban a la presa La Esperanza, se integró al cálculo un coeficiente de relación entre las áreas aportantes del mismo (Anexo 4.5), resumido en el Cuadro 16, con el que se proyectó los caudales medios en el sitio del objeto en estudio, utilizando una mayor densidad de información histórica de caudales antes de la construcción de la presa.

Cuadro 16. Coeficiente de relación (Kr) en áreas aportantes

Área aportante	Superficie km ²	%	Kr
Ciudad de Calceta	523,76	100,00%	1,00
Embalse La Esperanza	428,5	81,81%	0,81

El coeficiente de relación "Kr" de área aportante "Estación Calceta - Presa La Esperanza" es de 0,8181. El Cuadro 16, representa la relación entre las áreas de aportación pluvial. Este coeficiente se multiplicó con cada caudal medio mensual histórico que pasó por la estación de Calceta con el propósito de encontrar los caudales promedios en el punto de la presa La Esperanza (Cuadro 17), obteniendo un volumen anual medio de 284,73 hm³ con 242,02 hm³ al 85% del histórico y al comparar con 241,81 hm³, valor calculado utilizando el método estadístico de Kritski y Menkel al 85% de garantía, se tuvo como resultando un diferencia mínima de 0,21hm³ en volumen de año promedio y sustentando la aplicación del coeficiente Kr obtenido en la presente investigación.

Cuadro 17. Volúmenes y caudales medios mensuales promedio histórico
“Estación Calceta - Presa La Esperanza”

Medición	Estación Calceta		Presa La Esperanza	
	Caudal	Volumen	Caudal	Volumen
	m ³ /seg	hm ³	m ³ /seg	hm ³
Mes				
Enero	12,76	34,17	10,39	27,82
Febrero	25,66	62,09	20,9	50,56
Marzo	29,68	79,5	24,17	64,74
Abril	23,24	60,24	18,92	49,05
Mayo	13,7	36,68	11,15	29,87
Junio	8,05	20,86	6,55	16,99
Julio	4,81	12,87	3,91	10,48
Agosto	4,45	11,93	3,63	9,71
Septiembre	4,14	10,73	3,37	8,74
Octubre	3,35	8,97	2,73	7,3
Noviembre	1,99	5,15	1,62	4,19
Diciembre	2,42	6,49	1,97	5,28
Anual	134,25	349,68	109,31	284,73

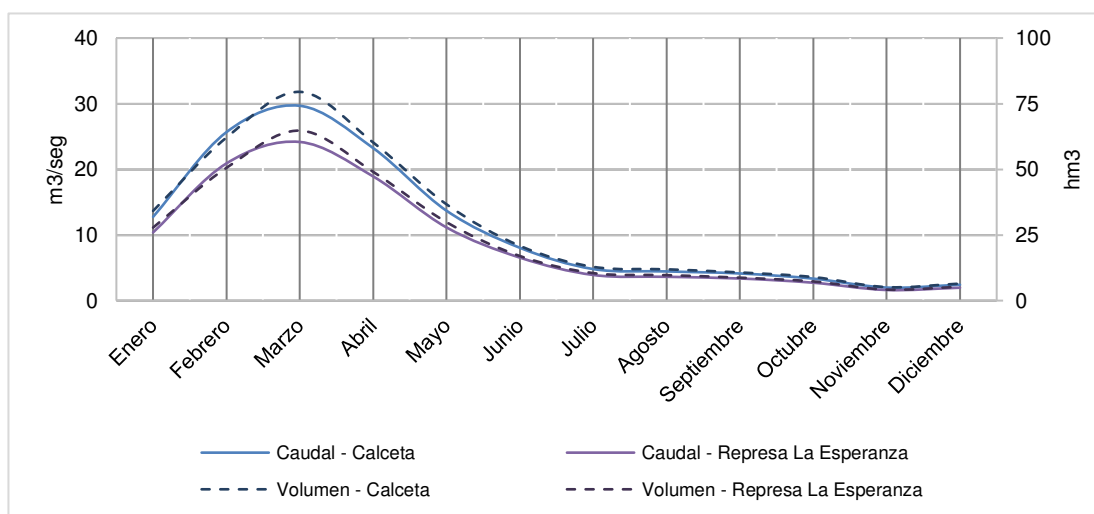


Figura 15. Curva caudal, volumen – meses del histórico promedio mensual
“Estación Calceta - Presa La Esperanza”.

4.1.2. Elaboración de las proyecciones pluviales del área en estudio a través de los datos históricos de las estaciones meteorológicas.

4.1.2.1. Data histórica de precipitaciones y elaboración de Isoyetas

Se recolectó y organizó una base de data histórica de las precipitaciones de las estaciones meteorológicas influyentes a la cuenca aportante al embalse La Esperanza, en un radio de 50 km partiendo del centroide de la cuenca

(Cuadro12), con un total de 50 estaciones meteorológicas (Anexo 4.6), analizadas entre los años 1980 – 2017 (38 años), información solicitada al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).

En el proceso de la organización de la base de datos general de precipitaciones medias mensuales, se aplicó la metodología de completación de datos hidrológicos faltantes a través de promedios vecinales, razones promedios y regresiones lineales (Cuadro 9), con el que se generó isoyetas mensuales (Anexo 4.9), mediante el programa ArcGIS 10.4.1 aplicando el método de isoyetas, se obtuvo la precipitación media de los meses y años en estudio (Anexo 5), extrayendo un cuadro general simplificado de precipitaciones medias mensuales de estadística básica (Cuadro 18) para la obtención de la proyección pluvial en los diferentes escenarios del modelo HadCM3, expuestos por el IPCC.

Cuadro 18. Simplificado general de precipitaciones medias mensuales del periodo 1980 – 2017, para la cuenca aportante al embalse La Esperanza

MES	Promedio	Mínimo	Máximo	Mediana
	mm	mm	mm	mm
Enero	273,96	147,99	603,21	215,04
Febrero	411,43	170,37	743,90	411,08
Marzo	320,54	202,73	947,29	291,77
Abril	283,68	98,91	969,11	243,98
Mayo	141,06	39,63	629,46	85,33
Junio	58,82	17,96	460,83	22,84
Julio	20,17	3,72	215,09	7,60
Agosto	23,91	3,22	263,06	4,39
Septiembre	26,28	8,10	360,69	5,50
Octubre	26,73	11,65	244,47	8,04
Noviembre	56,33	27,76	659,91	13,91
Diciembre	99,51	46,13	591,15	52,93
TOTAL	1742,42	778,17	6688,17	1362,41

4.1.2.2. Proyección pluviométrica aplicando modelo climático HadCM3

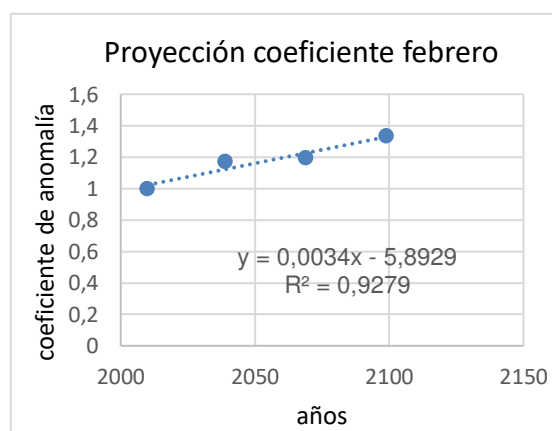
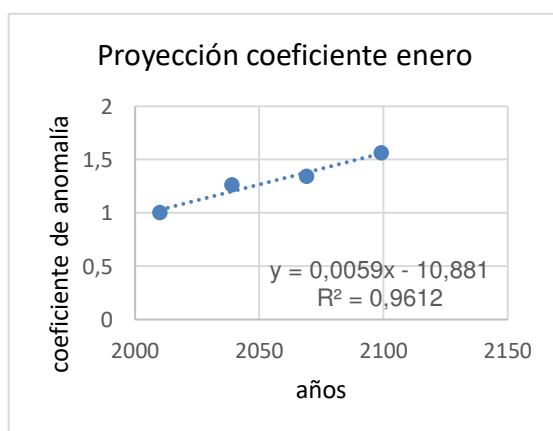
Las tablas del incremento de precipitación están ajustadas con las constantes de anomalías propuestas por el cuarto informe del IPCC en distintos escenarios en tres períodos de tiempo del modelo HadCM3, detalladas a continuación:

Cuadro 19. Promedio de los coeficientes de anomalía del modelo HadCM3 para proyección pluvial

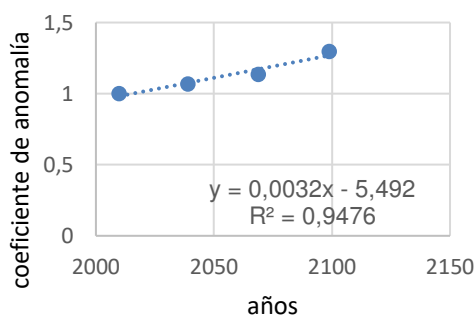
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
AÑO	PROMEDIO DE LOS COEFICIENTES DE ANOMALÍA (HadCM3 ESCENARIOS A1B-B1-A2)					
2010	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2039	1,2636	1,1728	1,0685	1,0468	1,0020	1,3506
2069	1,3407	1,1944	1,1348	1,1593	1,4049	2,4944
2099	1,5616	1,3340	1,2964	1,2028	1,6256	3,4338

	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
AÑO	PROMEDIO DE LOS COEFICIENTES DE ANOMALÍA (HadCM3 ESCENARIOS A1B-B1-A2)					
2010	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2039	1,6528	2,7322	2,1711	0,9565	0,8446	1,1485
2069	2,6619	5,9285	4,6259	2,5634	2,1351	1,4680
2099	3,9939	9,3123	6,2230	3,4098	3,4129	2,0214

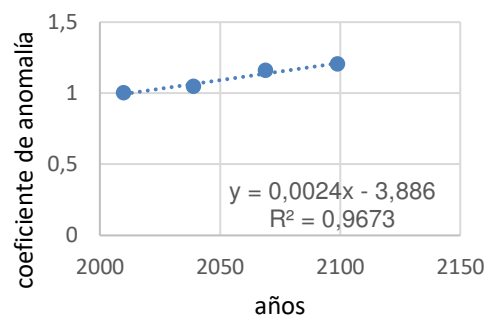
En los datos expuestos se presentan los promedios de las constantes de anomalía, de los escenarios: A1B, B1, A2, del modelo HadCM3, en los tres períodos de tiempo sugeridos por el IPCC, emparejando los promedios de coeficientes en los lapsos de tiempo propuestos, iniciando con coeficiente de anomalía 1 para el año 2010, y así sucesivamente hasta el año 2099 con los valores promedios calculados, obteniendo el Cuadro 19, posteriormente se realizaron regresiones de la variable constante de anomalía en la escala de tiempo (2010-2099) extrayendo las ecuaciones lineales de proyecciones mensuales que se muestran a continuación:



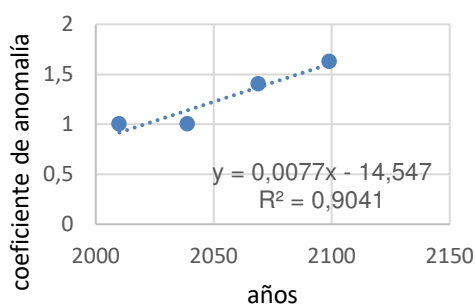
Proyección coeficiente marzo



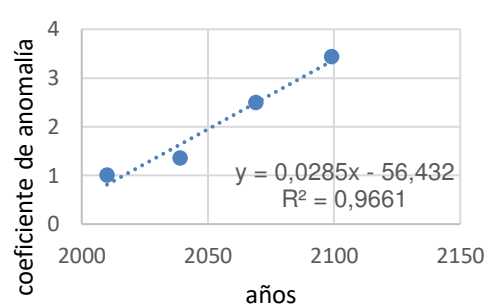
Proyección coeficiente abril



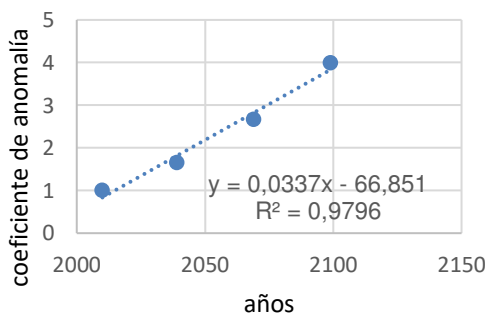
Proyección coeficiente mayo



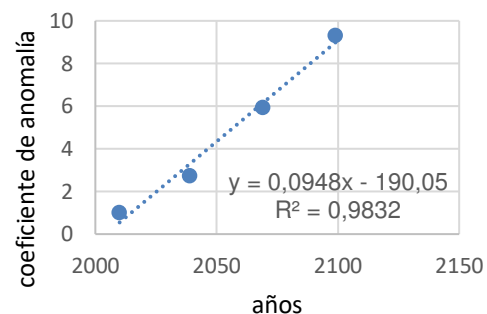
Proyección coeficiente junio



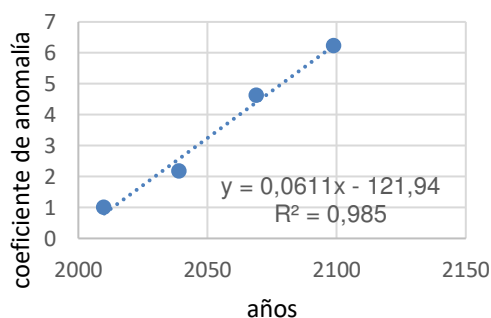
Proyección coeficiente julio



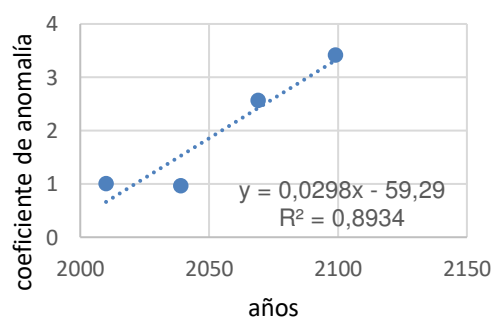
Proyección coeficiente agosto

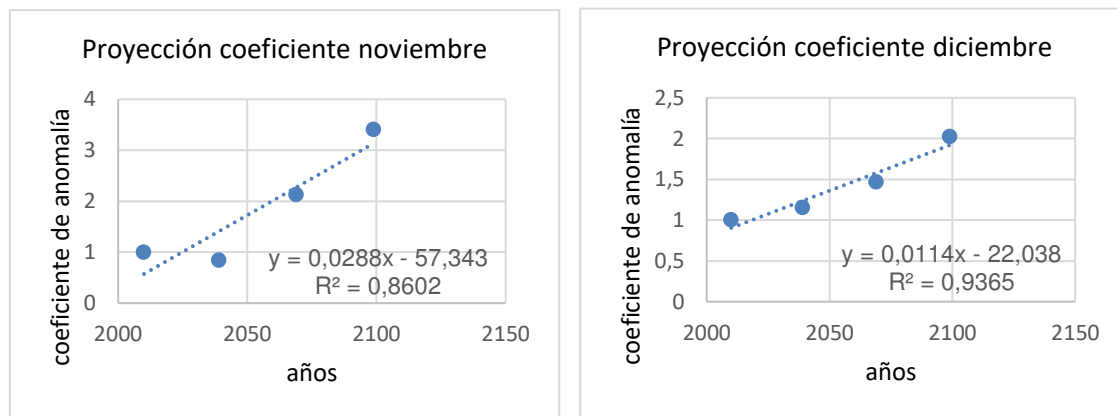


Proyección coeficiente septiembre



Proyección coeficiente octubre





Cuadro 20. Ecuaciones lineales para proyecciones pluviométricas

MESES	Ecuación lineal para proyección	R: Coeficiente de correlación	R2: Coeficiente de determinación	P: Significancia empírica
ENERO	$y = 0,0059x - 10,881$	0,980	0,961	0,020
FEBRERO	$y = 0,0034x - 5,8929$	0,963	0,928	0,037
MARZO	$y = 0,0032x - 5,492$	0,973	0,948	0,027
ABRIL	$y = 0,0024x - 3,886$	0,984	0,967	0,016
MAYO	$y = 0,0077x - 14,547$	0,951	0,904	0,049
JUNIO	$y = 0,0285x - 56,432$	0,983	0,966	0,017
JULIO	$y = 0,0337x - 66,851$	0,990	0,980	0,010
AGOSTO	$y = 0,0948x - 190,05$	0,992	0,983	0,008
SEPTIEMBRE	$y = 0,0611x - 121,94$	0,992	0,985	0,008
OCTUBRE	$y = 0,0298x - 59,29$	0,945	0,893	0,055
NOVIEMBRE	$y = 0,0288x - 57,343$	0,927	0,860	0,073
DICIEMBRE	$y = 0,0114x - 22,038$	0,968	0,937	0,032

En las ecuaciones lineales de proyección pluvial (Cuadro 20), la ordenada “y” representa la precipitación media futura, en función de la abscisa “x” referida al año proyectado (2010-2099). En el análisis de los valores correspondientes al coeficiente de determinación se deduce que la mayoría de las ecuaciones tienen un alto grado de significancia empírica, excepto octubre y noviembre, que son meses frecuentemente de esporádicas precipitaciones en la zona de estudio y que no influyen significativamente, por otra parte los caudales en el área de estudios en los meses secos se generan principalmente por los escurrimientos del manto freático que se recargaron en los meses de mayores precipitaciones (enero, febrero, marzo y abril).

Cuadro 21. Relación precipitación promedio-caudal medio histórico

Meses	Precipitación promedio histórica	Caudal medio histórico
Enero	273,95	10,39
Febrero	411,43	20,9
Marzo	320,54	24,17
Abril	283,68	18,92
Mayo	141,06	11,15
Junio	58,82	6,55
Julio	20,17	3,91
Agosto	23,91	3,63
Septiembre	26,28	3,37
Octubre	26,73	2,73
Noviembre	56,33	1,62
Diciembre	99,50	1,97

Relacionando las precipitaciones promedias históricas versus los caudales medios mensuales históricos, se obtuvo una regresión lineal de primer grado que se muestra en la Figura 16, donde la ordenada “y” representa el caudal medio futuro, en función de la abscisa “x” referida a la precipitación en análisis, estableciendo la siguiente fórmula:

$$Q_{mp} = 0,0528 * P_a + 14,4459 \quad (4.4)$$

Donde:

Q_{mp} : Caudal medio proyectado

P_a : Precipitación en análisis

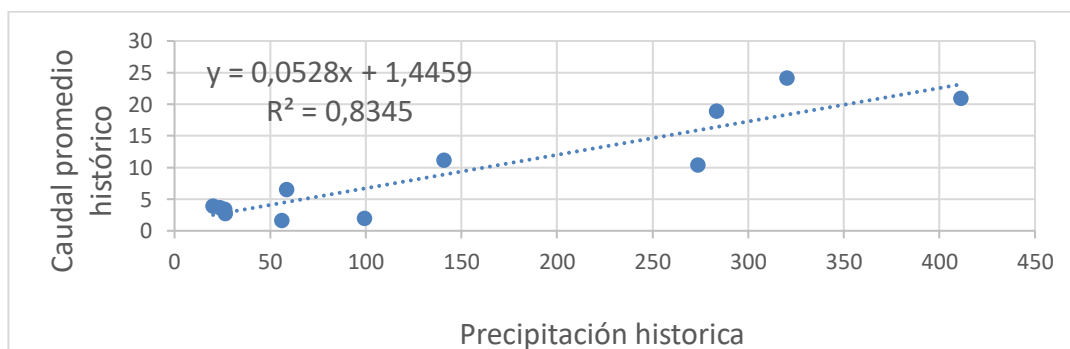


Figura 16. Relación precipitación vs caudales promedios históricos.

El coeficiente de determinación de la regresión de la relación precipitación promedio-caudal medio histórico se puede observar un $R^2=0,8345$ (Figura 16) que según Pearson la relación entre las variables es buena (Anexo 7), encasillándose entre los rangos de valoración cuantitativa de 0,8 a 0,9.

Con la finalidad de establecer el balance hídrico digital, se toma como referencia el año 2018 para la obtención de la curva guía media y aplicación *in situ*.

Cuadro 22. Proyección de precipitación y caudal

PROYECCIÓN DE PRECIPITACIÓN (mm)		CAUDAL MEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN PROYECTADA (m ³ /s)	
AÑO DE PROYECCIÓN (2018-2100)	2018	AÑO	2018
MES	PROYECCIÓN	MES	PROYECCIÓN
ENERO	220,46	ENERO	13,09
FEBRERO	398,05	FEBRERO	22,46
MARZO	281,73	MARZO	16,32
ABRIL	233,53	ABRIL	13,78
MAYO	84,61	MAYO	5,91
JUNIO	24,69	JUNIO	2,75
JULIO	8,78	JULIO	1,91
AGOSTO	5,52	AGOSTO	1,74
SEPTIEMBRE	7,48	SEPTIEMBRE	1,84
OCTUBRE	6,81	OCTUBRE	1,81
NOVIEMBRE	10,78	NOVIEMBRE	2,02
DICIEMBRE	51,19	DICIEMBRE	4,15

En el Cuadro 22 se observa las proyecciones de precipitación para el año 2018, obtenidas mediante las ecuaciones lineales de proyección pluviométrica (Cuadro 20), el resultado de la precipitación proyectada se la utilizó en la ecuación 4.4 “ $Q_{mp} = 0,0528 * P_a + 14,4459$ ” para la estimación de los valores de la proyección de caudal medio mensual del año en mención.

4.1.2.3. Proyecciones térmicas del área de la cuenca aportante al embalse La Esperanza.

Cuadro 23. Proyección térmica del modelo HADCM3

Periodo	Observado	MODELO DE PROYECCION HADCM3								
		2010 - 2039			2040 - 2069			2070 - 2099		
Escenario	Real	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2
Mes	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Enero	26,10	27,44	26,96	27,55	28,23	28,08	28,57	29,82	28,67	30,12
Febrero	26,35	27,72	27,33	27,76	28,50	28,41	28,72	29,97	28,85	30,21
Marzo	26,81	27,85	27,56	27,73	28,75	28,51	28,81	29,82	28,90	30,02
Abril	26,73	27,56	27,42	27,55	28,37	28,01	28,41	29,29	28,53	29,47
Mayo	26,14	26,98	26,86	26,92	27,48	27,23	27,55	28,35	27,77	28,45
Junio	25,11	25,98	25,78	25,98	26,63	26,42	26,73	27,56	26,97	27,66
Julio	24,65	25,73	25,71	25,67	26,68	26,54	26,91	27,78	27,02	27,95
Agosto	24,57	25,83	25,63	25,85	26,82	26,56	27,08	28,08	27,08	28,33
Septiembre	24,70	26,10	25,73	26,05	27,05	26,81	27,34	28,31	27,17	28,67
Octubre	24,92	26,22	26,03	26,15	27,68	27,21	27,86	29,11	27,91	29,42
Noviembre	25,22	26,43	26,15	26,31	27,77	27,38	28,22	29,46	28,02	29,71
Diciembre	25,81	26,94	26,61	26,97	27,83	27,68	28,43	29,48	28,18	30,05

Al igual que las precipitaciones se dedujo las ecuaciones para las proyecciones térmicas.

Cuadro 24. Promedio de temperaturas, modelo HadCM3 para proyección térmica

AÑO	PROMEDIO DE LAS TEMPERATURAS (HadCM3 ESCENARIOS A1B-B1-A2)					
2010	26,1000	26,3458	26,8083	26,7250	26,1417	25,1083
2039	27,1055	27,3263	27,6082	27,4070	26,8176	25,7897
2069	27,9268	28,1175	28,4154	28,0699	27,3347	26,4440
2099	28,8217	28,9464	29,0881	28,7198	27,9589	27,1069

	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
AÑO	PROMEDIO DE LAS TEMPERATURAS (HadCM3 ESCENARIOS A1B-B1-A2)					
2010	24,6520	24,5680	24,7000	24,9240	25,2182	25,8091
2039	25,5267	25,5332	25,6838	25,9079	26,1233	26,7031
2069	26,3714	26,3577	26,5709	27,0184	27,2740	27,6061
2099	27,0659	27,1327	27,3156	27,9019	28,1940	28,5506

Cuadro 25. Ecuaciones lineales para proyecciones térmicas

MESES	Ecuación lineal para proyección	R: Coeficiente de correlación	R2: Coeficiente de determinación	P: Significancia empírica
ENERO	$y = 0,0302x - 34,645$	0,9988	0,9977	0,0011
FEBRERO	$y = 0,0289x - 31,723$	0,9984	0,9969	0,0015
MARZO	$y = 0,0257x - 24,892$	0,9989	0,9978	0,0011
ABRIL	$y = 0,0224x - 18,24$	0,9998	0,9996	0,0002
MAYO	$y = 0,0201x - 14,205$	0,9985	0,997	0,0015
JUNIO	$y = 0,0224x - 19,878$	0,9998	0,9997	0,0001
JULIO	$y = 0,0272x - 30,004$	0,9983	0,9966	0,0017
AGOSTO	$y = 0,0287x - 32,993$	0,9982	0,9965	0,0017
SEPTIEMBRE	$y = 0,0294x - 34,312$	0,9976	0,9953	0,0024
OCTUBRE	$y = 0,0338x - 43,026$	0,9990	0,9981	0,0010
NOVIEMBRE	$y = 0,0339x - 43,014$	0,9990	0,9981	0,0010
DICIEMBRE	$y = 0,0307x - 35,967$	0,9999	0,9999	0,0000

4.1.2.4. Cálculo de Evapotranspiración

Los datos de evapotranspiración se obtuvieron a través del programa LocClain (FAO Local Climate Estimator) versión 1.0; el cual solicitó unas cifras respecto al radio de acción, número de estaciones equivalentes y la altura mayor de la elevación de la cuenca, reflejando unos valores que fueron promediados con los resultados obtenidos con las fórmulas de Thornthwaite, Turc y Coutagne; realizando un compendio de los datos mensuales del período de estudio, que se resumen en la siguiente cuadro:

Cuadro 26. Compendio del cálculo de evapotranspiración

Evapotranspiración							
Autor	Thornthwaite	Coutange	Turc	FAO (promedio estimado)	FAO (promedio bajo)	FAO (promedio alto)	Promedio Total
Mes	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Enero	132,98	88,02	106,33	107,66	90,82	124,51	108,39
Febrero	124,11	92,04	111,18	100,22	86,04	114,40	104,67
Marzo	145,75	86,93	105,01	111,20	96,13	126,28	111,88
Abril	140,04	88,98	107,48	103,42	90,17	116,67	107,79
Mayo	133,71	89,60	108,24	102,57	87,12	118,02	106,54
Junio	113,11	83,41	100,76	93,00	79,09	106,91	96,05
Julio	109,38	92,55	111,79	98,13	80,33	115,93	101,35
Agosto	108,11	86,07	103,97	105,16	84,60	125,72	102,27
Septiembre	106,93	85,37	103,12	105,76	84,60	125,72	101,92
Octubre	113,56	77,40	93,50	110,59	94,49	126,70	102,71
Noviembre	114,81	81,67	98,65	104,45	89,53	119,36	101,41
Diciembre	127,97	87,52	105,72	106,91	90,87	122,95	106,99
Año	1470,46	1039,56	1255,74	1249,07	1053,79	1443,17	1251,97

4.1.2.5. Estimación de recarga referencial

La estimación de la recarga referencial se la realizó, mediante diferencia de la precipitación y evapotranspiración hídrica de la cuenca en estudio, obteniendo como resultado lo que se observa en el Cuadro 27.

Cuadro 27. Estimación de la recarga referencial media del embalse, año 2018

Mes	Precipitación media histórica observada	Proyección de precipitación (2018)	Evapotranspiración promedio	Excedente hídrico	Recarga referencial
	mm	mm	mm	mm	mm
Enero	215,04	220,46	86,41	134,05	67,03
Febrero	411,08	398,05	80,44	317,61	158,81
Marzo	291,77	281,73	89,25	192,48	96,24
Abril	243,98	233,53	83,00	150,53	75,26
Mayo	85,33	84,61	82,32	2,29	1,15
Junio	22,84	24,69	74,64	0,00	0,00
Julio	7,60	8,78	78,76	0,00	0,00
Agosto	4,39	5,52	84,40	0,00	0,00
Septiembre	5,50	7,48	84,88	0,00	0,00
Octubre	8,04	6,81	88,76	0,00	0,00
Noviembre	13,91	10,78	83,83	0,00	0,00
Diciembre	52,93	51,19	85,80	0,00	0,00

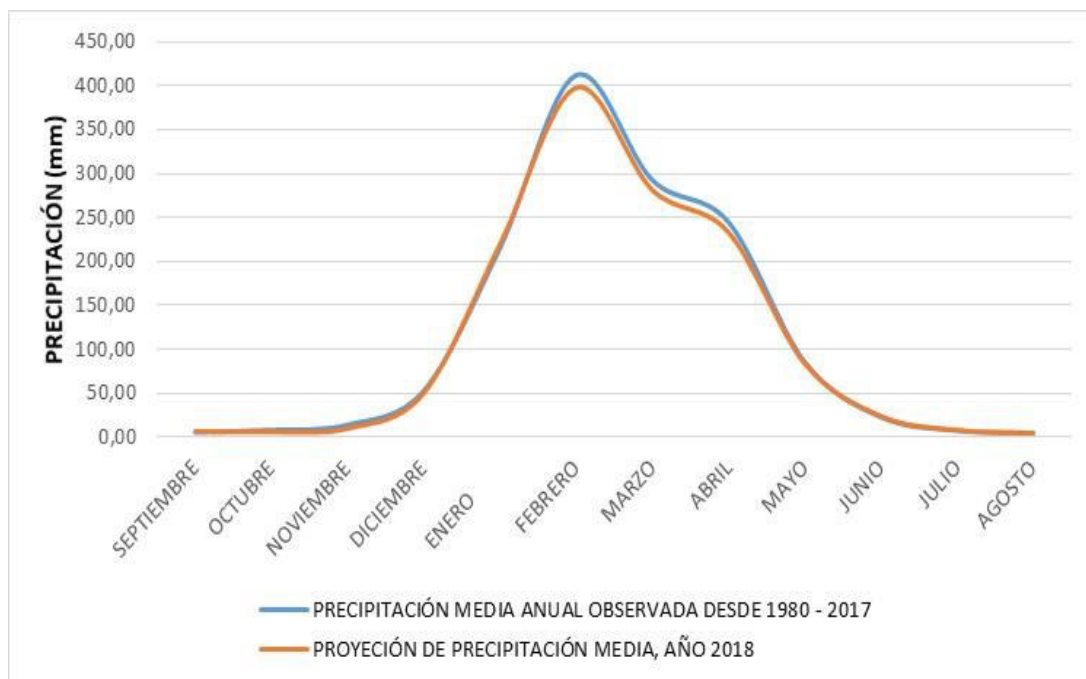


Figura 17. Precipitación media observada vs Proyección 2018

Cuadro 28. Estimación de recarga referencial media del embalse, año 2100

Mes	Precipitación media histórica observada	Proyección de precipitación (2100)	Evapotranspiración promedio	Excedente hídrico	Recarga referencial
	mm	mm	mm	mm	mm
Enero	215,04	324,50	102,80	221,70	110,85
Febrero	411,08	512,65	95,70	416,96	208,48
Marzo	291,77	358,29	106,18	252,11	126,06
Abril	243,98	281,55	98,75	182,80	91,40
Mayo	85,33	138,49	97,94	40,55	20,28
Junio	22,84	78,08	88,80	0,00	0,00
Julio	7,60	29,79	93,70	0,00	0,00
Agosto	4,39	39,65	100,41	0,00	0,00
Septiembre	5,50	35,05	100,98	0,00	0,00
Octubre	8,04	26,46	105,60	0,00	0,00
Noviembre	13,91	43,63	99,73	0,00	0,00
Diciembre	52,93	100,67	102,08	0,00	0,00

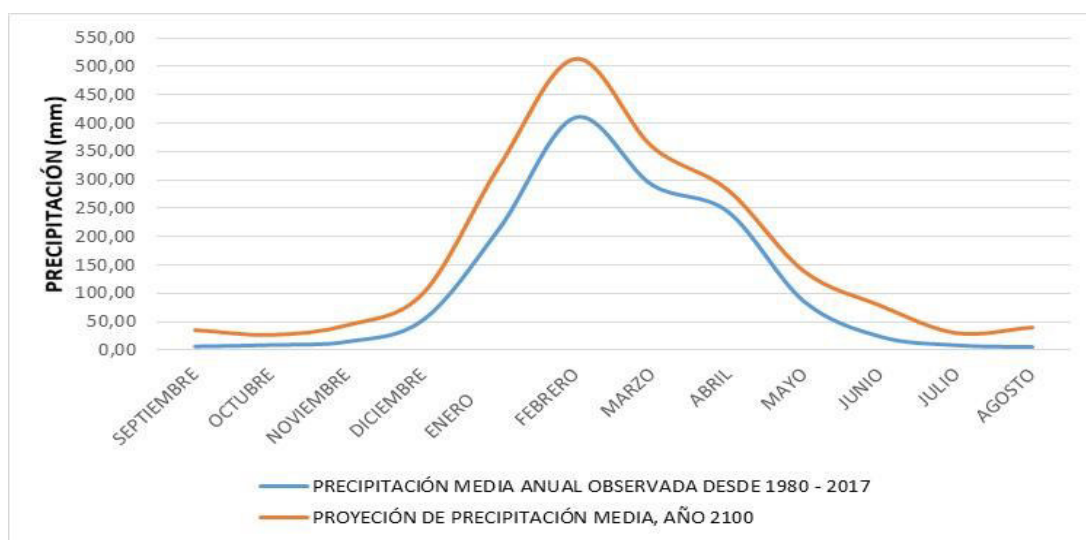


Figura 18. Precipitación media observada vs Proyección 2100

Los valores de la proyección de la precipitación varían de acuerdo al año seleccionado.

Cuadro 29. Volumen estimado de recarga media referencial del embalse La Esperanza

ÁREA DE LA CUENCA APORTANTE AL EMBALSE LA ESPERANZA		AÑO	ALTURA DE RECARGA REFERENCIAL	VOLUMEN ESTIMADO POR RECARGA REFERENCIAL	
Km ²	m ²		m	m ³	hm ³
428,51	428506932,2	2018	0,40	170752964	170,75
		2100	0,56	238703195,9	238,70

4.1.3. Extracción de curvas guías de operación a través de un balance digital en la regulación del volumen del embalse La Esperanza.

4.1.3.1. Análisis de niveles de almacenamiento

Se realizó un análisis de la data histórica de llenado y vaciado del embalse desde el año 1996 hasta el año 2017, obteniendo gráficos que demuestran el comportamiento de la relación entre el llenado y el vaciado del embalse La Esperanza, en un período de 22 años (Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22). Estos datos sirvieron de base en el análisis previo de las cotas mínimas, medias y máximas (Figura 23).

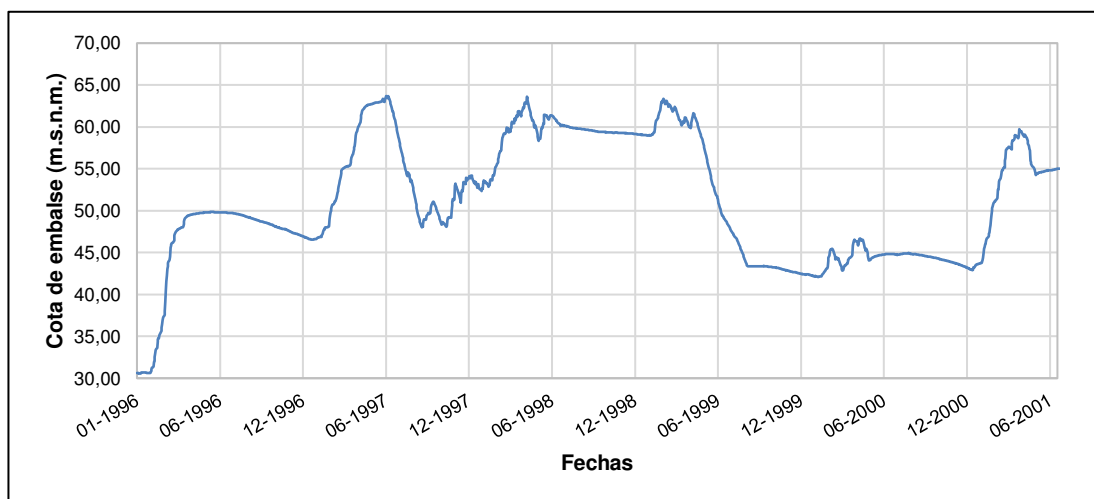


Figura 19. Niveles de cotas de funcionamiento de embalse (1/1996 – 6/2001)

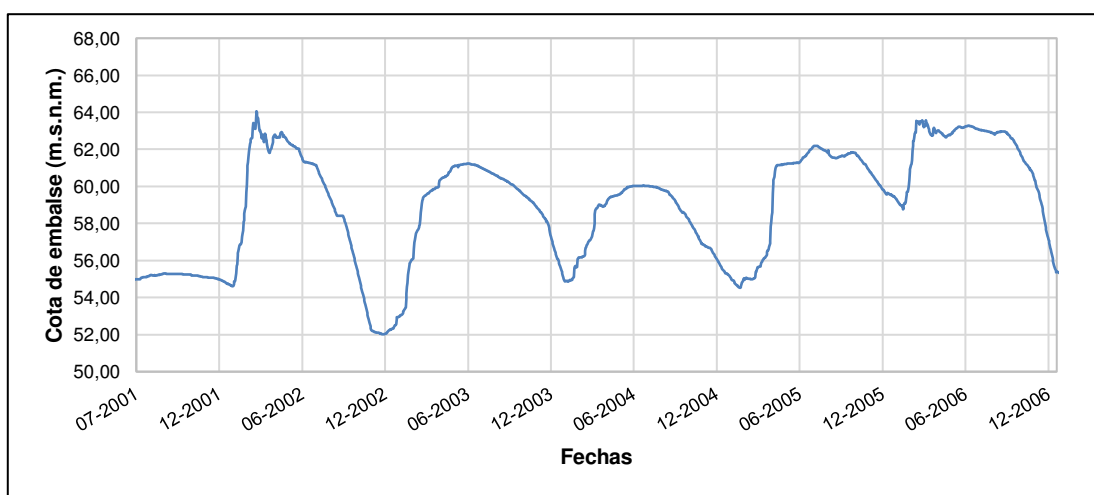


Figura 20. Niveles de cotas de funcionamiento de embalse (7/2001 – 12/2006)

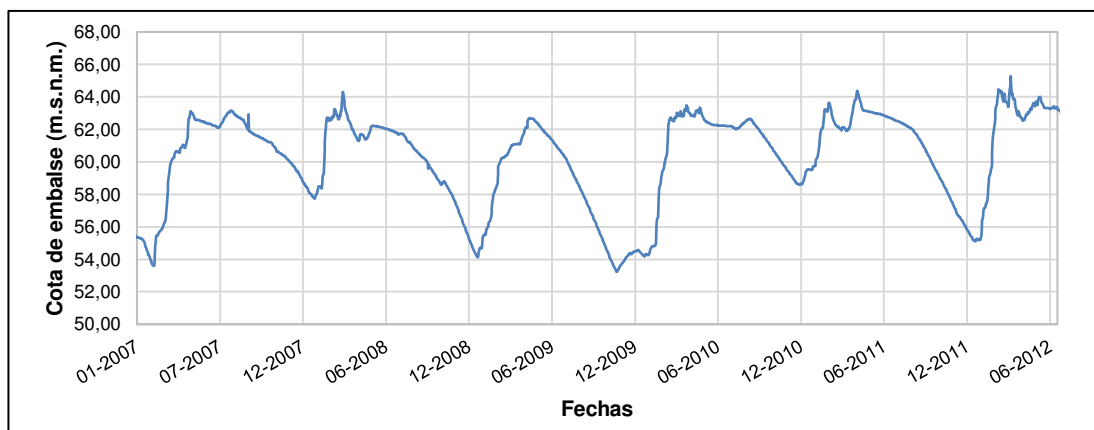


Figura 21. Niveles de cotas de funcionamiento de embalse (7/2007 – 12/2012)

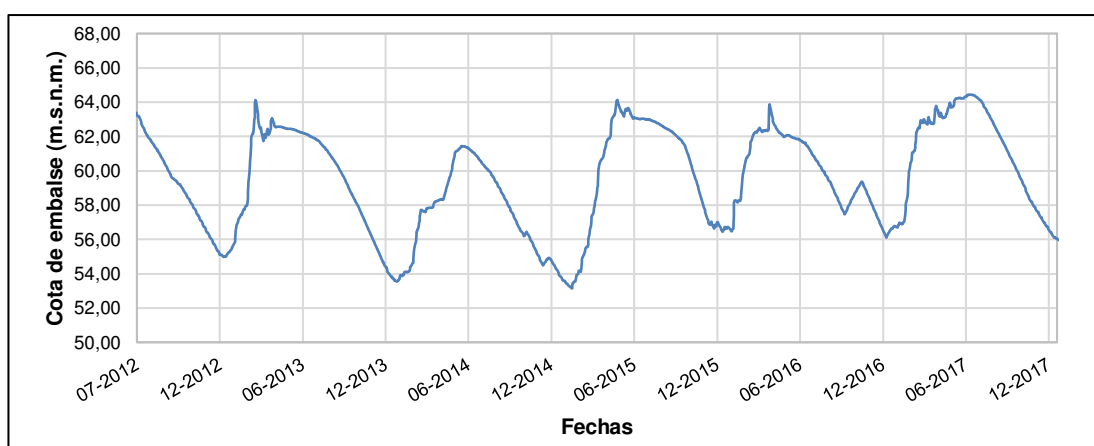


Figura 22. Niveles de cotas de funcionamiento de embalse (7/2012 – 12/2017)

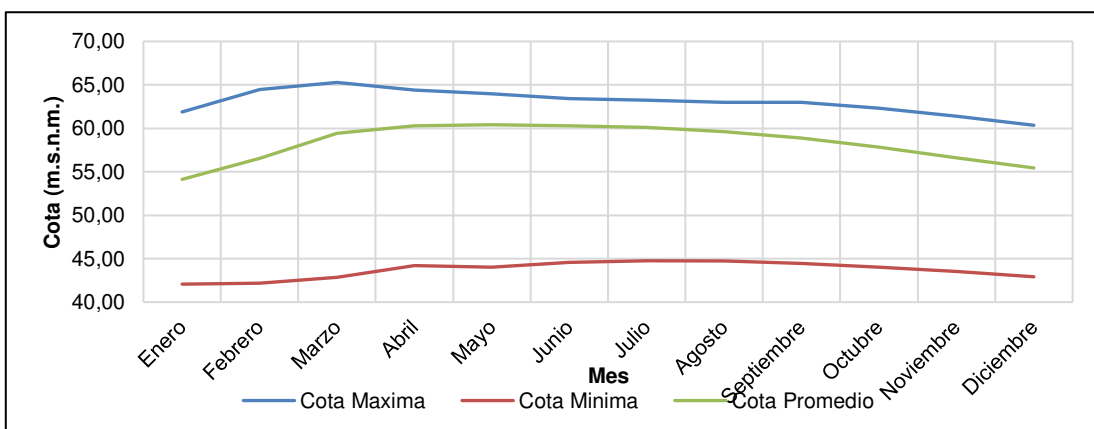


Figura 23. Curvas guías en análisis histórico previo (2000 - 2017)

Se representó en gráficos la operación de llenado y vaciado del embalse La Esperanza, mediante el análisis de los niveles para cada mes en estudio, observándose el comportamiento del nivel que tuvo el embalse expresado en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), considerando mínimos, máximos y

promedios, corroborando que el funcionamiento del embalse no trabaja en función de una curva guía predeterminada. En base este análisis, se estableció curvas guías en análisis histórico previo (Figura 23).

4.1.3.2. Análisis de caudales de vertido

Se realizó un análisis estadístico promedio, mínimo, máximo y mediano de los caudales vertidos al río desde la represa, para la deducción de los promedios mensuales de los años con registros existentes (2004 – 2017) (Cuadro 30).

Cuadro 30. Caudales históricos de vertidos al río

MES	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIANA
	m3/s	m3/s	m3/s	m3/s
Enero	6,36	1,50	15,95	5,06
Febrero	12,28	1,50	47,70	6,29
Marzo	27,05	1,50	100,40	18,75
Abril	24,11	1,50	59,28	27,36
Mayo	13,44	1,50	43,06	9,89
Junio	7,02	1,50	21,27	5,26
Julio	6,03	1,50	20,93	4,00
Agosto	7,01	1,50	20,00	5,09
Septiembre	6,90	1,50	17,68	5,00
Octubre	6,38	1,50	16,64	5,00
Noviembre	5,82	1,50	14,11	5,00
Diciembre	5,94	1,50	15,51	4,79

4.1.3.3. Información de diseños y sistemas de la represa

Para completar la base de datos requeridos para la investigación, se recopiló información técnica de las características de la represa “La Esperanza” tomado en cuenta ciertos parámetros en el modelo de simulación (Cuadro 31 y Cuadro 32).

Cuadro 31. Datos de diseño y construcción de la represa

Descripción	Valor	Unidad
Información del dique		
Nivel máximo de explotación	66	m.s.n.m.
Nivel de rebose en vertedor	62	m.s.n.m.
Nivel mínimo de explotación	37	m.s.n.m.
Volumen bajo cota 66	455	hm ³
Volumen bajo cota 37	41	hm ³
Volumen explotable	450	hm ³

Garantía de suministro de demanda resultante al volumen útil	88 %
Capacidad útil para regulación	386 hm ³
Volumen muerto	64 hm ³
Nivel de coronación de compuertas	67,50 m.s.n.m.
Vanos de aliviadero	4 v
Altura de vanos	7,5 m
Carga de compuertas	4 m
Máximo caudal desaguado	896 m ³ /s
Máxima sobre elevación sobre el nivel máximo de explotación	1,67 m
Cota de coronación de terraplén de la presa	69 m.s.n.m.
Capacidad del túnel de fondo	110 m ³ /s

Información hidrológica

Caudal mínimo del río	0,5 m ³ /s
Perdida por infiltración	0,5 m ³ /s
Caudal ecológico mínimo	3 - 5 * m ³ /s

* Dependiendo del invierno pasado

Fuente. Centro de Rehabilitación de Manabí (CRM), 1984; secretaria del agua (SENAGUA), 2014.

Cuadro 32. Sistemas acoplados al embalse La Esperanza

Descripción	Valor	Unidad
Capacidad de trasvase Daule - Peripa / La Esperanza	18	m ³ /s
Número de bombas trasvase La Esperanza / Poza Onda	6	u
Capacidad de trasvase La Esperanza / Poza Onda (x Bomba)	3,2	m ³ /s
Altura de la turbina de las bombas	43,5	m.s.n.m.
Nivel de operación mínima de las bombas	53	m.s.n.m.
Capacidad máxima Riego (Sistema de riego Carrizal Chone)	13	m ³ /s
Número de bombas Acueducto (La Esperanza / El Aromo)	6	u
Capacidad de bombeo La Esperanza / El Aromo (x Bomba)	1100	m ³ /h
Capacidad del río sin desborde en estudio inicial	200 - 280 *	m ³ /s
Capacidad del río sin desborde actual	80 - 85 *	m ³ /s

Otros Datos

Tipo de trasvase Daule - Peripa / La Esperanza	Gravedad
Tipo de válvulas de control trasvase Daule - Peripa / La Esperanza	Howell Bunger
Tipo de trasvase La Esperanza / Poza Onda	Bombeo
Tipo de presa	Heterogénea de tierra
Tipo de vertedero	Con compuertas
	TAINTOR
Tipo de válvulas de control toma de fondo	Howell Bunger

* Dependiendo los caudales de ríos aguas abajo

Fuente. Chávez, 2018; secretaria del agua (SENAGUA), 2014.

4.1.3.4. Cálculo de avenidas máximas

Para el cálculo de avenidas máximas se utilizó el método de hidrograma unitario, expuesto por Campos *et al.*, (2016), método con el cual se realizó

una serie de cálculos (Cuadro 33) especificados para el hidrograma unitario efectivo, entre ellos se generó un mapa de número de curva (NC) (Anexo 4.7), para posteriormente calcular la media del NC del área de la cuenca aportante y las coordenadas para el gráfico del hidrograma unitario efectivo (Cuadro 34, Figura 24) en el cual se identifica el caudal pico máxima.

Cuadro 33. Datos del cálculo para hidrograma unitario efectivo

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDADES
Área de la cuenca (Ac)	428,50	km ²
Área de río principal (Ar)	6237282,95	m ²
Altura máxima del cauce del río (hr)	60,00	m
Altura de mínima de lecho de río (hf)	27,00	m
Longitud del río principal (L)	25040,10	m
Pendiente media del río (Sr)	0,00132	m/m
Tiempo de concentración (Tc)	10,18	horas
Tiempo de retardo (Tr)	6,11	horas
Duración de la lluvia (de)	4,94	horas
Tiempo pico (Tp)	8,58	horas
Tiempo base (Tb)	22,88	horas
Caudal pico (Qp)	10,39	m ³ /s/mm
Numero de curva (CN)	85,90	-----
Diferencia potencial máxima ente P y Q (S)	41,69	mm
Precipitación (P)	163,53	mm
Escorrentía superficial (Qe)	122,32	mm

Cuadro 34. Coordenadas del hidrograma unitario efectivo

T	Q	T	Q
hora	m ³ /s	hora	m ³ /s
0,00	0,00	12,01	953,56
0,86	19,07	12,87	826,42
1,72	95,36	13,73	724,70
2,57	203,43	15,44	546,71
3,43	355,99	17,16	406,85
4,29	546,71	18,87	305,14
5,15	762,84	20,59	228,85
6,00	978,98	22,30	165,28
6,86	1131,55	24,02	124,60
7,72	1233,27	25,73	95,36
8,58	1271,41	30,02	45,77
9,44	1245,98	34,31	22,89
10,29	1169,70	38,60	11,44
11,15	1067,98	42,89	5,09

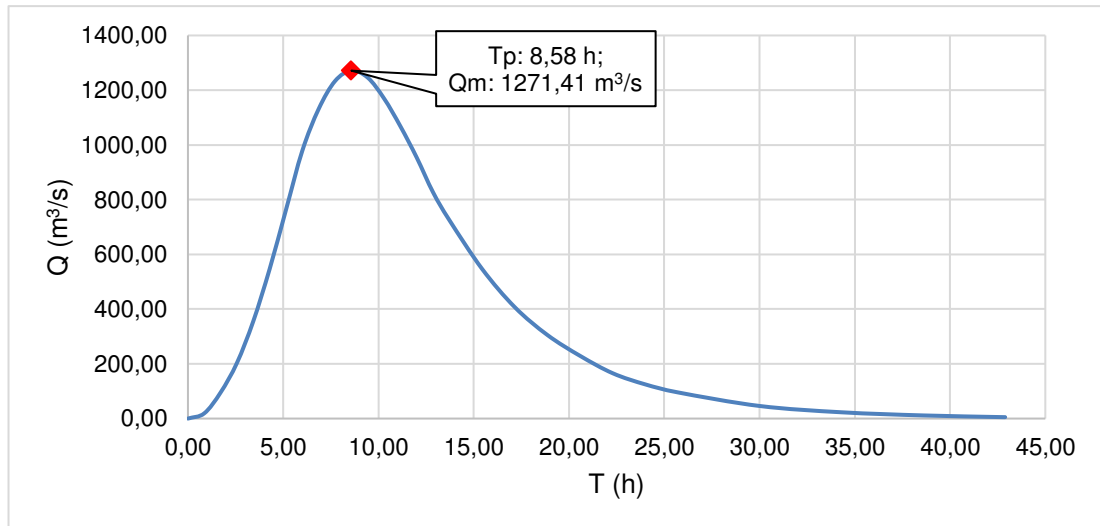


Figura 24. Hidrograma efectivo con identificación del caudal máximo

4.1.3.5. Balance hídrico

Esta actividad se analizó en el contexto del embalse La Esperanza para identificar sus entradas y salidas, parámetros que influyen significativamente en el balance hídrico de la zona, para lo cual se elaboró un esquema gráfico (Figura 25) y un flujograma de procesos (Figura 26), en la descripción de los sistemas que influyen en el balance hídrico del área en estudio.

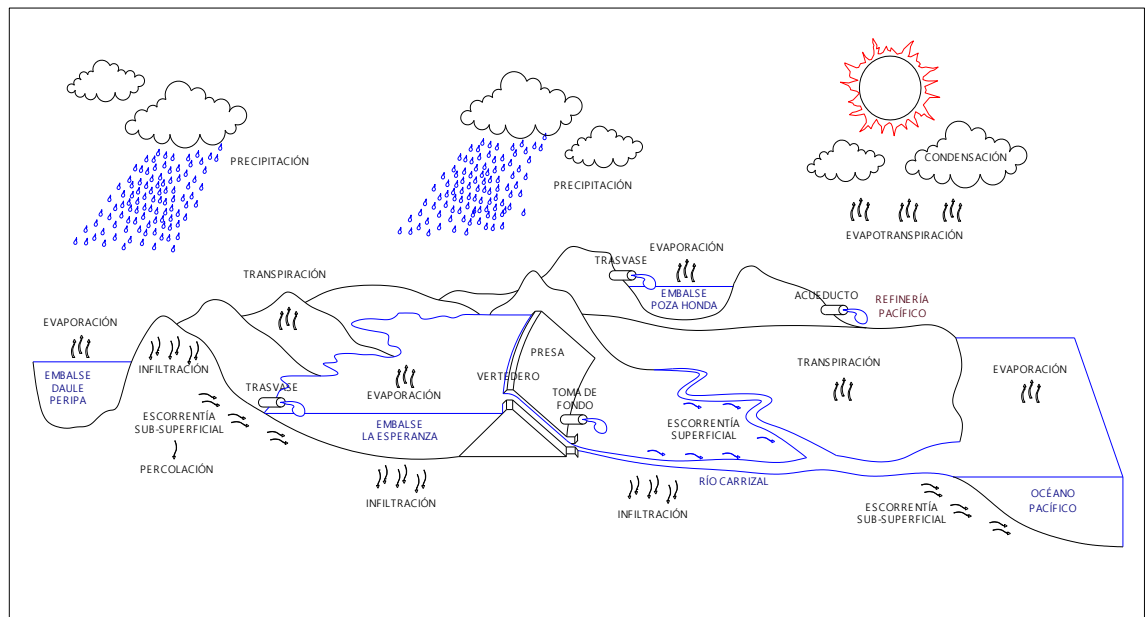


Figura 25. Esquema de balance hídrico del área de estudio.

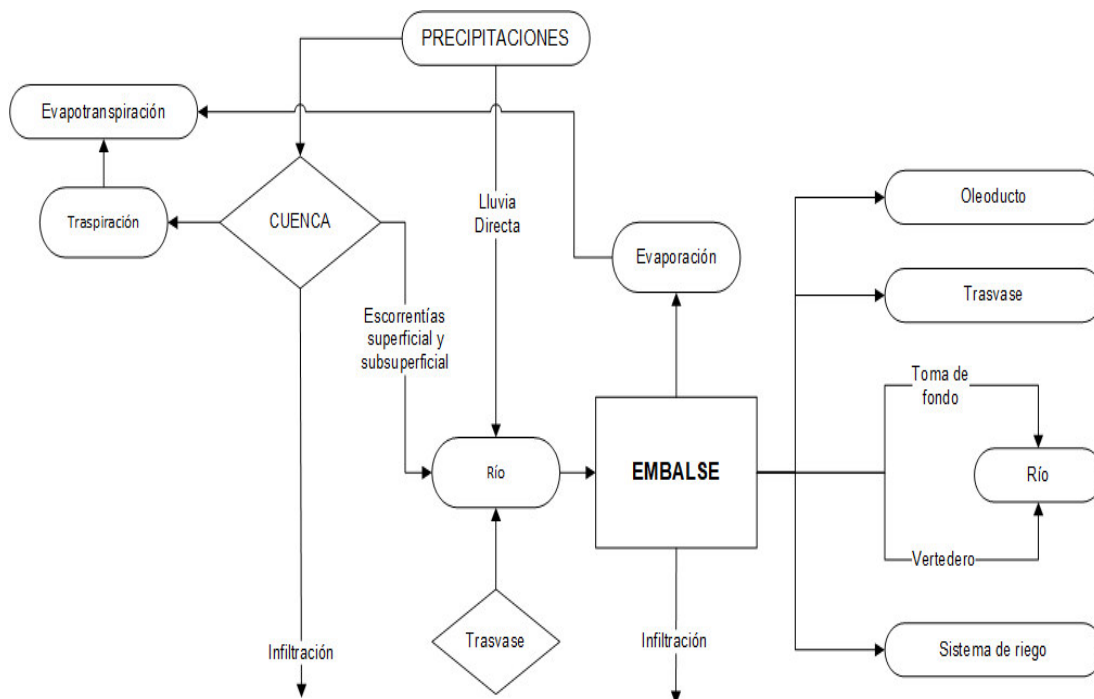


Figura 26. Diagrama de flujo de los sistemas conectados al embalse La Esperanza

La Figura 25, describe que el embalse La Esperanza está conectado en un sistema con dos trasvases, uno de entrada (Daule Peripa – La Esperanza) y otro de salida (La Esperanza – Poza Honda), además de un sistema de riego (Carrizal – Chone) y un acueducto (La Esperanza – Aromo), además la presa cuenta con dos mecanismos para verter el agua al río, una toma de fondo y un vertedero. Las precipitaciones caen en la superficie de la cuenca y llegan al embalse en forma de escorrentía superficial y subsuperficial.

4.1.3.6. Capacidades del embalse

Tomando en cuenta los parámetros de diseño de la presa, sistemas y capacidad del embalse, se realizó el esquema contenido en la Figura 27, el cual muestra los volúmenes, niveles y/o cotas, resaltando el nivel de fondo (NF), nivel de volumen muerto (NVM), nivel de operación de trasvase Poza Honda (NOT), nivel de aguas normales (NAN), nivel máximo operacional (NMO) y nivel de volumen de borde de rebose (NVR).

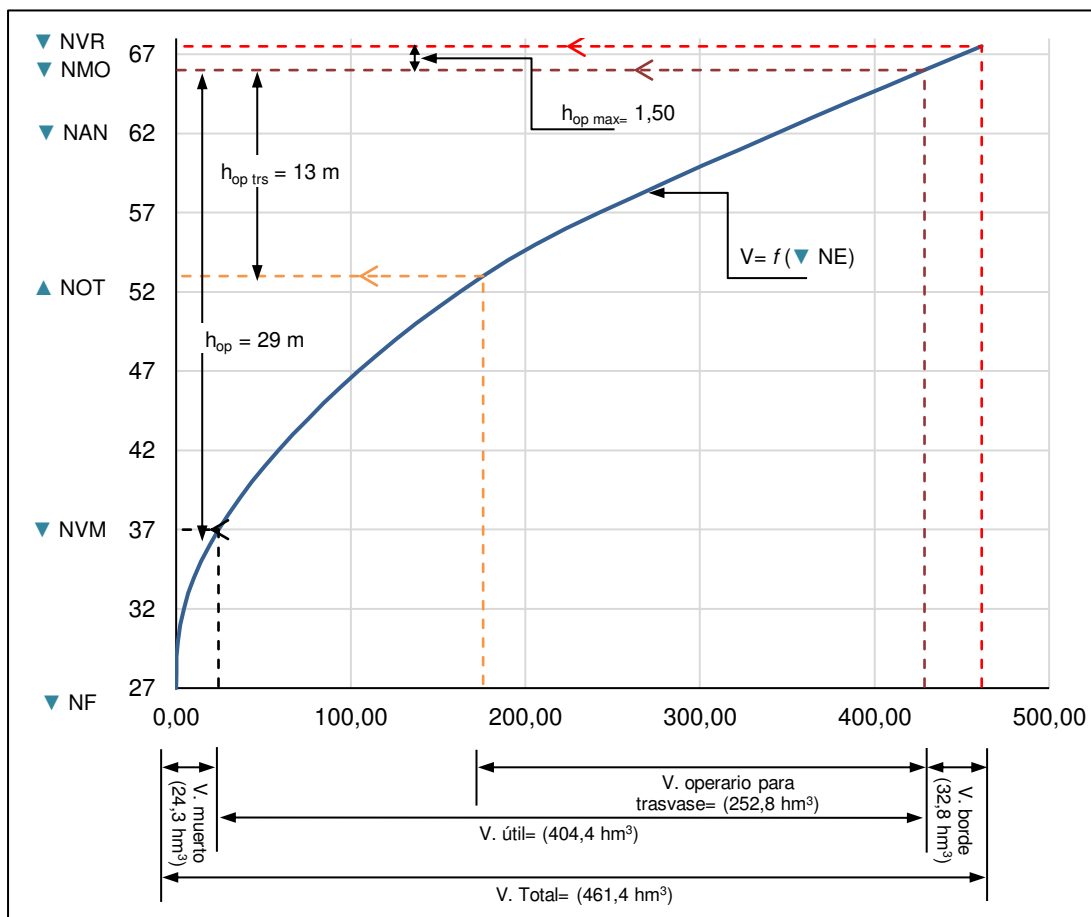


Figura 27. Curva de capacidad del embalse

4.1.3.7. Regulación de embalse La Esperanza en condiciones media, mínima y máxima precipitación

Con datos expuestos de los resultados anteriores se abarcó todos los elementos disponibles para realizar el balance hídrico, aplicando el método de balance digital propuesto por Campos *et al.* (2016), adaptando los sistemas de riego, trasvases y acueducto se simuló los balances hídricos para tres condiciones climáticas en media, mínima y máxima precipitación (Cuadro 35, Cuadro 36 y Cuadro 37).

Cuadro 35. Regulación del embalse La Esperanza en condiciones de media precipitación, año 2018

Mes	Caudal medio mensual ingreso embalse	Perdidas		Caudal al río	Aliviadero o vertedero	Toma de riego	TRASVASES			Acueducto		ΣQ perd. + ec.	Q disp.	Q reg.	Δ Q	V. [hm³]		V fin	COTA
	Q	Q filtr.	Q evap.	Q ec.	Q vert.	Q R.	Q T- DP.	Nº BOMBAS	Q T- PH.	Nº BOMBAS	Q A-A.					+	-		
	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s		m³/s		m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s				
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[5]	[6]	[7]	Nº BOMBAS	[8]	Nº BOMBAS	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]
Enero	29,06	0,50	15,48	10,00	0,00	0,00	0,00		0		0,00	2	0,56	21,54	7,53	0,00	7,53	20,16	0,00
Febrero	41,41	0,53	18,42	10,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	27,50	13,90	0,00	13,90	33,63	0,00	285,80	60,20
Marzo	33,76	0,54	16,90	10,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	26,00	7,76	0,00	7,76	20,79	0,00	306,59	61,35
Abril	32,35	0,54	18,03	10,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	27,13	5,22	0,00	5,22	13,52	0,00	320,11	62,06
Mayo	22,56	0,53	16,12	10,00	0,00	0,00	0,00	2	6,40	2	0,56	28,61	-6,05	0,00	-6,05	0,00	-16,20	303,91	61,21
Junio	16,48	0,53	13,20	10,00	0,00	3,00	11,48	3	9,60	2	0,56	31,89	-15,41	-11,48	-3,93	0,00	-10,18	293,73	60,65
Julio	15,62	0,52	13,18	10,00	0,00	3,00	11,48	3	9,60	2	0,56	31,87	-16,25	-11,48	-4,77	0,00	-12,77	280,96	59,92
Agosto	15,08	0,51	12,83	10,00	0,00	3,00	11,48	3	9,60	2	0,56	31,50	-16,42	-11,48	-4,94	0,00	-13,23	267,72	59,12
Septiembre	16,22	0,51	13,88	10,00	0,00	3,00	11,48	3	9,60	2	0,56	32,54	-16,32	-11,48	-4,84	0,00	-12,54	255,18	58,34
Octubre	15,60	0,49	13,30	10,00	0,00	3,00	11,48	3	9,60	2	0,56	31,95	-16,35	-11,48	-4,87	0,00	-13,05	242,13	57,49
Noviembre	17,12	0,47	14,62	10,00	0,00	3,00	11,48	3	9,60	2	0,56	33,26	-16,14	-11,48	-4,66	0,00	-12,09	230,05	56,67
Diciembre	19,94	0,45	15,34	10,00	0,00	3,00	11,48	3	9,60	2	0,56	33,95	-14,01	-11,48	-2,53	0,00	-6,78	223,27	56,20
												Σ	-82,55			MAX +	256,22		
												Q reg.	-11,48			MAX -	-242,71		
																V =	498,92		

Cuadro 36. Regulación del embalse La Esperanza en condiciones de mínima precipitación, año 2018

Mes	Caudal medio mensual ingreso embalse	Perdidas		Caud al al río	Aliviader o o vertedero	Toma de riego	TRASVASES			Acueducto		ΣQ <i>perd. + ec.</i>	$Q_{disp.}$	$Q_{reg.}$	ΔQ	V. [hm³]		V_{fin}	COTA	
	Q	$Q_{filtr.}$	$Q_{evap.}$	$Q_{ec.}$	$Q_{vert.}$	$Q_R.$	$Q_{T-DP.}$	N° BOMBAS	$Q_{T-PH.}$	N° BOMBAS	$Q_{A-A.}$					+	-			hm³
	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s		m³/s		m³/s					m³/s	m³/s	m³/s		m³/s
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[5]	[6]	[7]	N° BOMBAS	[8]	N° BOMBAS	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	
Enero	20,17	0,48	10,23	5,00	0,00	2,00	10,96	2	6,40	2	0,56	24,67	-4,50	-10,96	6,45	17,28	0,00	232,73	56,86	
Febrero	22,84	0,51	12,17	0,00	0,00	2,00	10,96	2	6,40	2	0,56	21,64	1,20	-10,96	12,15	29,40	0,00	262,13	58,78	
Marzo	23,49	0,53	11,17	0,00	0,00	2,00	10,96	2	6,40	2	0,56	20,66	2,82	-10,96	13,78	36,90	0,00	299,03	60,94	
Abril	18,90	0,54	11,92	0,00	0,00	2,00	10,96	2	6,40	2	0,56	21,42	-2,52	-10,96	8,44	21,88	0,00	320,91	62,10	
Mayo	14,71	0,54	10,65	5,00	0,00	2,00	10,96	3	9,60	2	0,56	28,35	-13,64	-10,96	-2,68	0,00	-7,19	313,72	61,73	
Junio	11,73	0,53	8,72	5,00	0,00	3,00	10,96	3	9,60	2	0,56	27,42	-15,69	-10,96	-4,73	0,00	-12,27	301,45	61,08	
Julio	10,91	0,53	8,71	5,00	0,00	3,00	10,96	3	9,60	2	0,56	27,40	-16,49	-10,96	-5,53	0,00	-14,82	286,64	60,25	
Agosto	10,65	0,52	8,48	5,00	0,00	3,00	10,96	3	9,60	2	0,56	27,15	-16,50	-10,96	-5,54	0,00	-14,85	271,79	59,37	
Septiembre	11,71	0,51	9,17	5,00	0,00	3,00	10,96	3	9,60	2	0,56	27,84	-16,13	-10,96	-5,18	0,00	-13,42	258,37	58,54	
Octubre	11,25	0,50	8,79	5,00	0,00	3,00	10,96	3	9,60	2	0,56	27,45	-16,19	-10,96	-5,24	0,00	-14,03	244,34	57,64	
Noviembre	12,73	0,48	9,67	5,00	0,00	3,00	10,96	3	9,60	2	0,56	28,31	-15,58	-10,96	-4,62	0,00	-11,98	232,36	56,83	
Diciembre	14,39	0,45	10,14	5,00	0,00	3,00	10,96	3	9,60	2	0,56	28,75	-14,36	-10,96	-3,40	0,00	-9,11	223,25	56,20	
												Σ	-			MAX +	445,85			
												$Q_{reg.}$	-10,96			MAX -	-215,45			
																V =	661,31			

Cuadro 37. Regulación del embalse La Esperanza en condiciones de máxima precipitación, año 2018

Mes	Caudal medio mensual ingreso embalse	Perdidas		Caudal al río	Aliviadero o vertedero	Toma de riego	TRASVASES			Acueducto		ΣQ perd. + ec.	$Q_{disp.}$	$Q_{reg.}$	ΔQ	V. [hm³]		V_{fin}	COTA
	Q	$Q_{filtr.}$	$Q_{evap.}$	$Q_{ec.}$	$Q_{vert.}$	$Q_R.$	$Q_{T-DP.}$	N° BOMBAS	$Q_{T-PH.}$	N° BOMBAS	$Q_{A-A.}$	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	+	-	hm³	m.s.n.m.
	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s		m³/s		m³/s								
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[5]	[6]	[7]		[8]		[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]
Enero	59,01	0,51	24,41	25,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	50,47	8,54	0,00	8,54	22,87	0,00	254,88	58,32
Febrero	69,05	0,53	29,05	25,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	55,13	13,92	0,00	13,92	33,67	0,00	288,55	60,36
Marzo	76,94	0,54	26,66	42,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	69,75	7,18	0,00	7,18	19,24	0,00	307,78	61,42
Abril	79,40	0,54	28,44	45,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	74,54	4,87	0,00	4,87	12,61	0,00	320,39	62,07
Mayo	60,36	0,54	25,42	36,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	62,52	-2,16	0,00	-2,16	0,00	-5,78	314,62	61,78
Junio	49,10	0,53	20,81	33,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	54,91	-5,81	0,00	-5,81	0,00	-15,06	299,55	60,97
Julio	35,88	0,52	20,79	20,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	41,88	-5,99	0,00	-5,99	0,00	-16,04	283,51	60,07
Agosto	39,64	0,51	20,23	26,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	47,30	-7,66	0,00	-7,66	0,00	-20,53	262,98	58,83
Septiembre	49,73	0,50	21,88	32,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	54,95	-5,22	0,00	-5,22	0,00	-13,52	249,46	57,97
Octubre	33,83	0,49	20,97	17,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	39,02	-5,19	0,00	-5,19	0,00	-13,90	235,56	57,05
Noviembre	52,00	0,47	23,07	31,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	55,09	-3,10	0,00	-3,10	0,00	-8,03	227,53	56,50
Diciembre	56,28	0,46	24,19	32,50	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2	0,56	57,70	-1,42	0,00	-1,42	0,00	-3,82	223,72	56,23
												Σ	-2,05				MAX +	265,19	
												$Q_{reg.}$	0,00				MAX -	-244,77	
																	V =	509,96	

En el Cuadro 35, Cuadro 36 y Cuadro 37, se puede observar la regulación del embalse la Esperanza en condiciones de media, mínima y máxima precipitación para el año 2018 con sus respectivas pérdidas y ganancias hídricas, mediante una hoja de cálculo en el software Microsoft Excel 2016 se representó la regulación ideal. En estos procesos intervienen varios elementos, los cuales influyen en el aumento o disminución del volumen del embalse, como pérdidas (evapotranspiración, caudal ecológico, toma de riego, trasvase Poza Honda, acueducto La Esperanza el Aromo) y ganancias (transvase Daule Peripa y precipitaciones pluviales).

En estas regulaciones digitales hídricas se deduce el nivel mensual del volumen embalsado en hm^3 , donde los valores positivos (+) y negativos (-) de las variables que intervienen, permiten obtener el resultado del volumen mensual; cuando los valores son positivos hay recarga hídrica y si los valores son negativos habrá un déficit por lo que será necesario trasvasar para cubrir la cuota y si el volumen captado es mayor a la capacidad máxima de almacenamiento o por encima de la curva guía, se considerará como volumen de vertido. Las cotas de la curva guía del balance hídrico digital se procesan a través de la función polinómica de segundo grado producto de la relación volumen-cota (Ecuación 4.2) “ $c = -0,0001 V^2 + 0,1148 V + 35,557$ “ que se dedujo del Cuadro 15. Para los valores de evapotranspiración se utilizó la ecuación de Turc por ser la más cercana al promedio de los resultados de la zona en estudio aplicando los coeficientes de variación mensual obtenidos de la ecuación de Thornthwaite.

Al final de la columna del cuadro de regulación se obtienen las respectivas cotas mensuales, que luego tienen que ser traducida a cota de regulación diaria y autocorregirla a medida que se presentan condiciones meteorológicas fuera del rango previsto y de operación excepcional, en función de la curva guía a seguir, como parte de la gestión integrada de los recursos hídricos del embalse, en la planificación y toma de decisiones.

La Figura 29 y Figura 30 representa la secuencia cota-mes de las curvas guías en media, mínima y máxima precipitación que se ajustan entre el nivel

mínimo de restricción por bombeo (53,40 m.s.n.m.) y el nivel máximo de resguardo calculado por avenidas de caudales extremos. (62,10 m.s.n.m.).

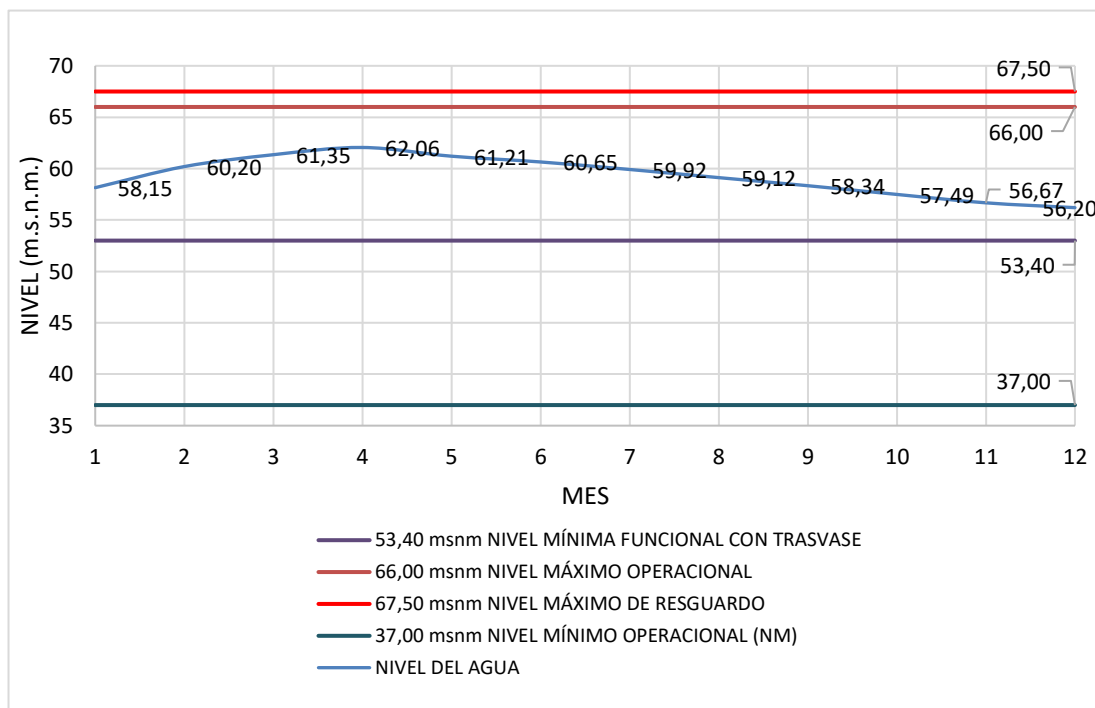


Figura 28. Curva guía de operación en condiciones medias, año 2018

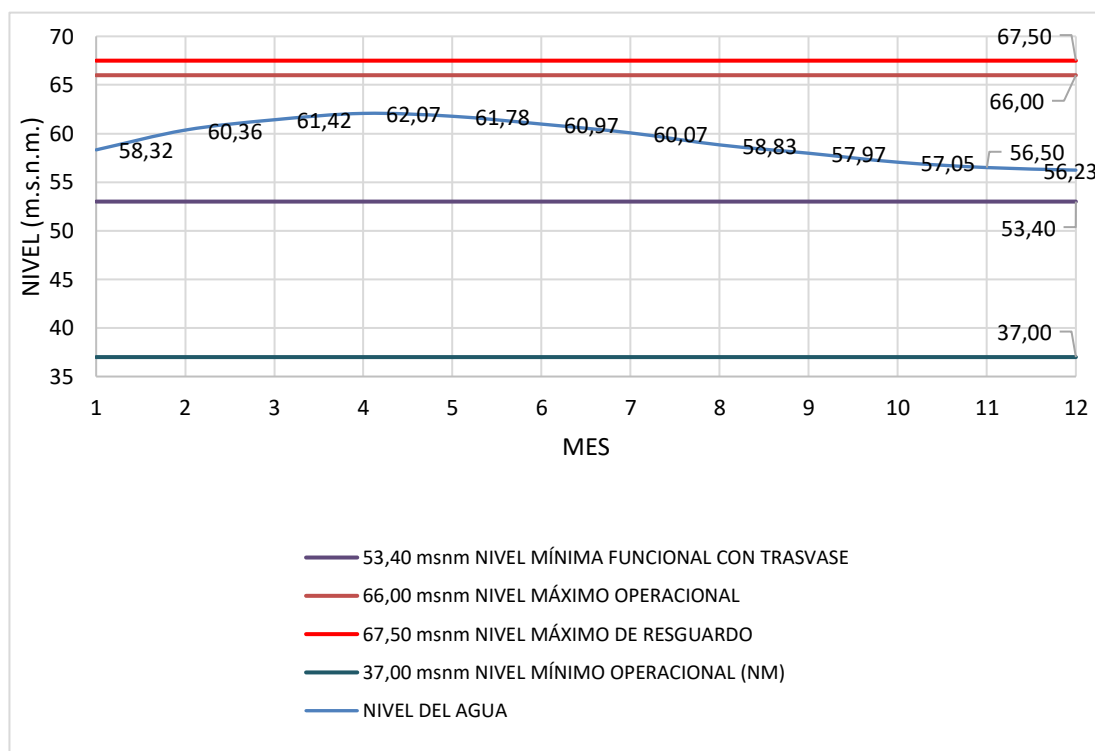


Figura 29. Curva guía de operación en condiciones máximas, año 2018

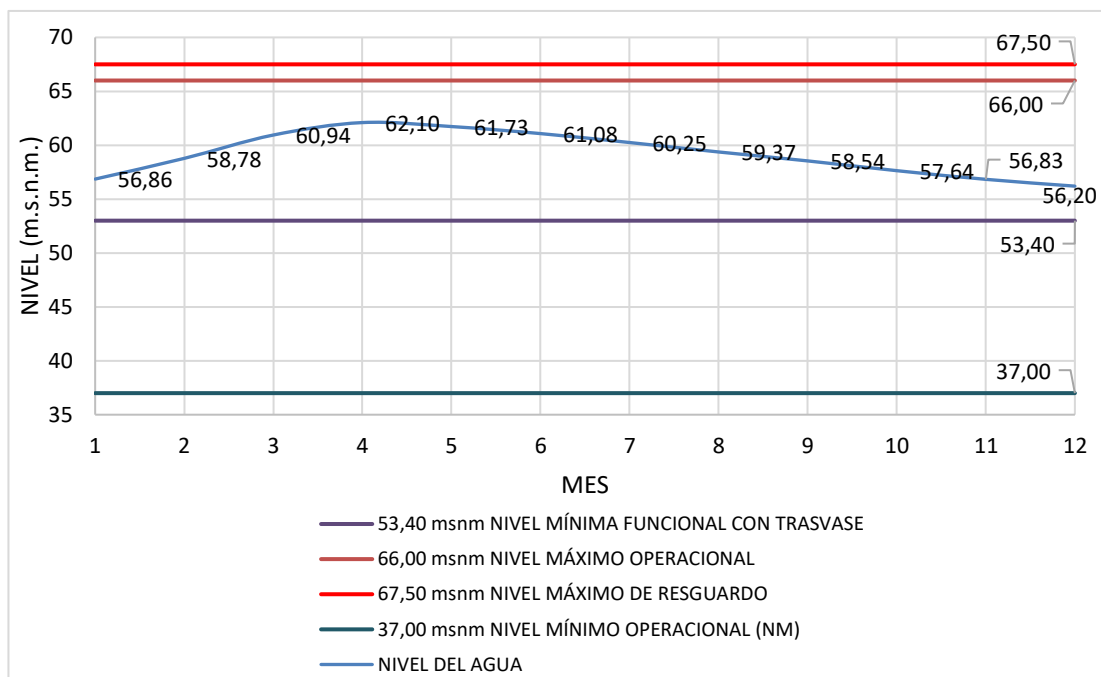


Figura 30. Curva guía de operación en condiciones mínimas, año 2018

Se puede observar que los gráficos de curvas guías del embalse manifiestan su política de operación, para manejo eficiente y tener la capacidad de corregir cualquier efecto adverso. La cota 67,50 m.s.n.m es la cota de coronación de las compuertas de la presa en estudio; la cota 66,00 m.s.n.m es el máximo operacional; el volumen máximo de aguas normales no debe sobrepasar la cota 62,10 m.s.n.m para el control de avenidas máximas extraordinarias; se considera la cota 53,40 m.s.n.m como restricción por concepto de nivel mínimo de bombeo del trasvase La Esperanza a Poza Honda y la cota 37 m.s.n.m como nivel mínimo de operación, encontrándose por debajo de ésta el volumen muerto del embalse.

Cuadro 38. Análisis de avenidas máximas, periodo 1987- 2019

Año	Fecha de análisis	Días	Cota msnm	Diferencia m	Volumen hm ³	Volumen almacenado (VA) hm ³	Volumen evacuado (VE) hm ³	VA+V E (hm ³)	Volumen máximo diario hm ³
1987	Feb /mar 1987	59			332,00				5,63
1997	feb-1997	28			197,64				7,06
2005	15/4/2005	7	57,03	3,32	246,22	61,10	1,04	62,14	8,88

	22/4/2005		60,35		307,32				
2006	9/2/2006	18	59,72	3,76	295,20				
	27/2/2006		63,48		371,17	75,97	2,4624	78,43	4,36
	7/2/2007	5	53,60	1,82	190,25				
2007	12/2/2007		55,42		219,04	28,79	3,68064	32,47	6,49
	17/4/2007	11	60,95	2,17	319,09				
	28/4/2007		63,12		363,52	44,43	17,636832	62,06	5,64
2008	8/2/2008	12	58,36	4,38	269,88			109,8	
	20/2/2008		62,74		355,53	85,65	24,1704	2	9,15
<hr/>									
2009	10/2/2009	6	56,48	1,53	236,75				
	16/2/2009		58,01		263,55	26,79	1,6416	28,43	4,74
2010	5/2/2010	8	54,86	3,54	209,96				
	13/2/2010		58,40		270,61	60,64	1,1664	61,81	7,73
2011	24/1/2011	14	60,34	2,42	307,13				
	7/2/2011		62,76		355,95	48,82	0,6912	49,51	3,54
2012	29/1/2012	25	57,59	6,88	256,05				
	23/2/2012		64,47		392,63	136,58	48,870432	185,4	7,42
	16/3/2012	8	63,41	0,78	369,68				
	24/3/2012		64,19		386,50	16,82	112,52304	129,3	16,17
2013	18/5/2012	9	63,68	-0,02	375,46				
	27/5/2012		63,66		375,03	-0,43	37,881216	37,45	4,16
	27/2/2013	18	58,10	6,01	265,17				
	17/3/2013		64,11		384,76	119,59	37,736928	157,3	8,74
2014	24/2/2014	8	54,65	1,78	206,61				
	4/3/2014		56,43		235,90	29,29	5,184	34,48	4,31
2016	9/4/2016	4	62,36	1,48	347,63				
	13/4/2016		63,84		378,90	31,28	22,83	54,11	13,53
	14/4/2016	11	63,72	-1,11	376,32				
	25/4/2016		62,61		352,82	-23,50	61,61	38,11	3,46
2017	3/3/2018	9	58,92	2,11	280,17				
	12/3/2018		61,03		320,68	40,51	3,1104	43,62	4,85
2018	3/3/2018	9	58,92	2,11	280,17				
	12/3/2018		61,03		320,68	40,51	3,1104	43,62	4,85
2019	6/2/2019	7	58,37	4,66	270,06				
	13/2/2019		63,03		361,62	91,56	9,4608	101,0	14,43
	13/2/2019	8	63,03	-0,23	361,62				
	21/2/2019		62,80		356,79	-4,83	42,23232	37,40	4,67

Se puede considerar como avenida máxima el caudal de mayor volumen que sobrepasa el límite de transporte de su cauce o supera los caudales promedios normales (eventos extremos). El análisis de avenida de caudales

máximos se realizó con el objetivo de determinar la línea de volumen de aguas normales en el embalse La Esperanza.

En el Cuadro 38 se puede observar el análisis de avenidas máximas durante el periodo 1987-2019, en la cual se extrajo los años que presentaron laminaciones altas en un tiempo mínimo, que fueron los siguientes: Año 2012 con 16,17 hm³/día durante 8 días, 2016 con 13,53 hm³/día durante 4 días y 2019 con 14,43 hm³/día durante 7 días.

Cuadro 39. Caudal soportable promedio del río Carrizal, aguas abajo del embalse La Esperanza en el periodo húmedo, que evita inundaciones en el área de influencia

Caudal		
m3/s	m3/día	hm3/día
65	5616000	5,62

Cuadro 40. Análisis de volumen de resguardo de la represa La Esperanza

Volumen de avenida: Máxima, evacuada y de resguardo.			
	V. aven. Max	V. max evac	V. resguardo
2012	(8 días) hm3	(8 días) hm3	(8 días) hm3
	129,34	44,93	84,42
	V. aven. Max	V. max evac	V. resguardo
2016	(28 días) hm3	(28 días) hm3	(28 días) hm3
	197,64	157,25	40,39
	V. aven. Max	V. max evac	V. resguardo
2019	(59 días) hm3	(59 días) hm3	(59 días) hm3
	332,00	331,34	0,65

Del Cuadro 40 se escogió el volumen de 84.42 hm³ como muestra del análisis del volumen de resguardo, por medio del cual utilizando la fórmula polinómica de cota-volumen del embalse La Esperanza se determinó la cota 62,10 m.s.n.m como nivel de aguas normales y máxima de la curva guía de operación, entendiéndose que entre la cota 66 m.s.n.m. y 62,10 m.s.n.m, reflejó un volumen de 84,71 hm³ (Cuadro 41), como resultado del empate de volumen de resguardo escogido en la muestra del análisis.

Cuadro 41. Resumen de cota – volumen de resguardo

cota	66,00	m.s.n.m.
volumen	426,98	hm ³
cota	62,10	m.s.n.m.
volumen	342,28	hm ³
resguardo	84,71	hm ³

4.1.3.8. Elaboración de gráfico de despacho

Distribución típica del escurrimiento en porcentaje

Cuadro 42. Distribución en porcentajes

	Periodo Húmedo				Periodo Seco								Total
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
PROM%	14,98	19,71	17,30	14,97	8,37	4,15	2,36	2,55	2,58	2,69	4,03	6,31	100,00
MEDIANA%	14,82	24,21	19,51	16,05	6,89	2,97	2,14	1,94	1,95	2,17	2,44	4,91	100,00
75%	18,90	22,08	2,85	25,46	5,44	4,38	4,38	2,27	2,00	2,67	2,00	7,57	100,00
85%	21,21	19,16	24,38	9,37	3,82	3,55	2,86	3,30	2,97	3,31	3,05	3,02	100,00

En el Cuadro 42 se refleja la distribución típica del escurrimiento en porcentaje para los valores promedios y mediana; 75% y 85% de escurrimiento garantizados de años tipos de la data histórica analizada.

Determinación del déficit relativo de consumo (dc)

Cuadro 43. Déficit relativo de consumo

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
MEDIANA %	14,82	24,21	19,51	16,05	6,89	2,97	2,14	1,94	1,95	2,17	2,44	4,91	100,00
Upro. (%)	3,32	4,62	5,11	4,95	7,14	10,49	10,84	10,84	10,49	10,84	10,49	10,84	100,00
Déficit	-11,50	-19,59	-14,40	-11,11	0,25	7,52	8,71	8,90	8,55	8,68	8,05	5,93	56,60

dc: 0,57

En el Cuadro 43 se expone los datos de déficit relativo de consumo resultado de la resta entre la entrega bruta en hm³ y la distribución en porcentajes en medianas condiciones.

Cuadro 44. Relación entre α y β_u

bu	1,12
a	0,85

Cuadro 45. Entrega garantizada

U (hm ³)	241,81
Pt (hm ³)	38,17
R (hm ³)	203,64

En el Cuadro 45 se destellan los valores de entrega bruta, pérdidas totales anuales y entrega neta en hm³.

Cálculo de los parámetros del escurrimiento y la entrega por períodos

Cuadro 46. Escurrimiento de cálculo para el período húmedo

W85,H (hm ³)	117,31
W85,S (hm ³)	10,57
Wc,H (hm ³)	170,53
Wc,S (hm ³)	71,28
Wc (hm ³)	241,81

En el Cuadro 45 se revelan los resultados del cálculo de escurrimiento para el período seco y húmedo al 85 % de garantía, seleccionando el periodo húmedo entre los meses de enero a abril y el periodo seco entre mayo a diciembre donde la entrega bruta “U” tiene que ser igual al escurrimiento de cálculo “Wc”.

Cuadro 47. Entrega de escurrimientos, demanda actual y déficit

Entrega de escurrimiento		Entrega actual real		Entrega déficit	
garantizado al 85% en hm³		demanada promedio en hm³		trasvase daule pripa en hm³	
UH	43,51	UH	80,71	UH	37,20
US	198,291	US	367,80	US	169,51
TOTAL	241,81	TOTAL	448,52	TOTAL	206,71

En los resultados plasmados en el Cuadro 47 se puede observar la entrega de escurrimiento garantizado al 85% de cálculo por lluvias en la cuenca aportante al embalse La Esperanza, equivalente a un volumen de 241.81 hm³ por año, teniendo en cuenta que el volumen de entrega anual real de demanda actual real es de 448.52 hm³; el déficit de 206.71 hm³ es cubierto mediante el

abastecimiento del embalse Daule Peripa, el cual actúa como una boya de salvación en el balance hídrico del sistema.

Cuadro 48. Distribución mensual del escurrimiento de cálculo

#	Distribución	PERÍODO HÚMEDO				PERÍODO SECO								H	S
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
1	Wmed (%)	14,82	24,21	19,51	16,05	6,89	2,97	2,14	1,94	1,95	2,17	2,44	4,91	74,59	25,41
2	Año real 1(%)	15,83	11,31	14,22	14,15	4,22	4,14	2,72	2,72	2,85	2,95	10,67	14,22	55,51	44,49
3	Año real 2(%)	10,63	15,48	25,94	11,12	11,08	4,90	2,98	2,56	3,78	4,30	2,47	4,78	63,16	36,84
4	Año real 3(%)	17,84	20,35	20,18	10,72	5,24	3,60	2,96	2,78	3,08	3,84	3,90	5,52	69,09	30,91
5	W85 (hm3)	22,26	36,36	29,30	24,11	10,35	4,46	3,21	2,92	2,92	3,25	3,67	7,37	112,03	38,16
6	Año real 1	23,78	16,98	21,36	21,26	6,34	6,21	4,08	4,09	4,27	4,43	16,02	21,36	83,37	66,81
7	Año real 2	15,97	23,24	38,96	16,69	16,63	7,36	4,47	3,84	5,67	6,45	3,70	7,18	94,86	55,32
8	Año real 3	26,79	30,57	30,31	16,10	7,87	5,41	4,44	4,18	4,62	5,77	5,85	8,28	103,76	46,43

En el Cuadro 48 exhibe las distintas distribuciones mensuales de escurrimiento, donde se trabajó con una garantía del 85% en 3 años reales con su respectiva distribución en porcentajes con valores de escurrimiento cercanos a la entrega bruta aplicados por períodos (seco y húmedo) con la finalidad de determinar la línea superior e inferior de entrega garantizada.

Determinación de la (LSEG)

Cuadro 49. Rama de llenado

Tip	Magnitud	ENE	FEB	MAR	ABR	Total
1	Wc,H	33,88	55,35	44,60	36,70	170,53
	UH	8,03	11,16	12,36	11,96	43,51
	Llenado	25,85	44,18	32,24	24,74	
	Coords	235,89	261,75	305,93	338,17	
2	Wc,H	48,63	34,73	43,69	43,48	
	UH	8,03	11,16	12,36	11,96	
	Llenado	40,60	23,56	31,33	31,52	
	Coords	242,67	283,28	306,84	338,17	
3	Wc,H	28,71	41,78	70,03	30,01	
	UH	8,03	11,16	12,36	11,96	
	Llenado	20,68	30,62	57,67	18,05	
	Coords	229,20	249,88	280,50	338,17	
4	Wc,s	44,03	50,24	49,81	26,46	
	Us	8,03	11,16	12,36	11,96	
	Vaciado	36,00	39,07	37,45	14,50	
	Coords	225,65	261,65	300,72	338,17	
		213,22				

Cuadro 50. Rama de vaciado

Tip	Magnitud	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total
1	Wc,s	19,33	8,34	6,00	5,45	5,46	6,08	6,85	13,77	71,28
	Us	17,27	25,38	26,22	26,22	25,38	26,22	25,38	26,22	198,29
	Vaciado	-2,06	17,04	20,22	20,77	19,92	20,15	18,52	12,45	
	Coords	338,17	340,23	325,25	305,03	284,26	264,34	244,19	225,67	213,22
2	Wc,s	6,77	6,63	4,36	4,36	4,56	4,73	17,09	22,79	
	Us	17,27	25,38	26,22	26,22	25,38	26,22	25,38	26,22	
	Vaciado	10,50	18,75	21,87	21,86	20,82	21,50	8,28	3,43	
	Coords	340,23	329,73	310,97	289,11	267,25	246,43	224,93	216,65	213,22
3	Wc,s	21,43	9,48	5,76	4,95	7,31	8,32	4,77	9,25	
	Us	17,27	25,38	26,22	26,22	25,38	26,22	25,38	26,22	
	Vaciado	-4,16	15,90	20,46	21,27	18,07	17,91	20,60	16,97	
	Coords	336,07	340,23	328,50	308,04	286,77	268,70	250,79	230,19	213,22
4	Wc,s	12,08	8,31	6,82	6,41	7,09	8,86	8,98	12,72	
	Us	17,27	25,38	26,22	26,22	25,38	26,22	25,38	26,22	
	Vaciado	5,19	17,07	19,40	19,81	18,28	17,36	16,39	13,50	
	Coords	340,23	335,04	317,97	298,57	278,76	260,48	243,12	226,72	213,22

El Cuadro 49 y Cuadro 50 se exponen los valores de la rama de llenado y vaciado respectivamente, valores resultantes de la distribución mensual de escurrimiento de cálculo de la estadística mediana, en tres años tipos reales, mediante del cual se extrajeron las coordenadas en función del llenado y vaciado con respecto a la entrega bruta en periodo seco y húmedo.

Cuadro 51. Coordenadas del gráfico de despacho y curva guía en hm3

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB
Indice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
LSEG	213,22	249,88	280,50	338,17	338,17	340,23	325,25	305,03	284,26	264,34	244,19	225,67	213,22	249,88
Vt	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23	340,23
Vmto	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18
Vmáx	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98	426,98

Indice	0	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9	10	11	12
LIEG	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	22,18	112,53	97,55	77,33	56,55	36,63	22,18	22,18	22,18

CURVA GUÍA	223,27	252,17	285,8	306,59	320,11	303,91	293,73	280,96	267,72	255,18	242,3	230,05	223,27	252,17
RESTRICCIÓN	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21	187,21

ANÁLISIS SENS.	-10,05	-2,29	-5,30	31,58	18,06	36,32	31,52	24,07	16,54	9,16	1,89	-4,38	-10,05	-2,29
% RELACIÓN	-2,95%	0,67%	1,56%	9,28%	5,31%	10,68%	9,26%	7,07%	4,86%	2,69%	0,56%	1,29%	2,95%	0,67%

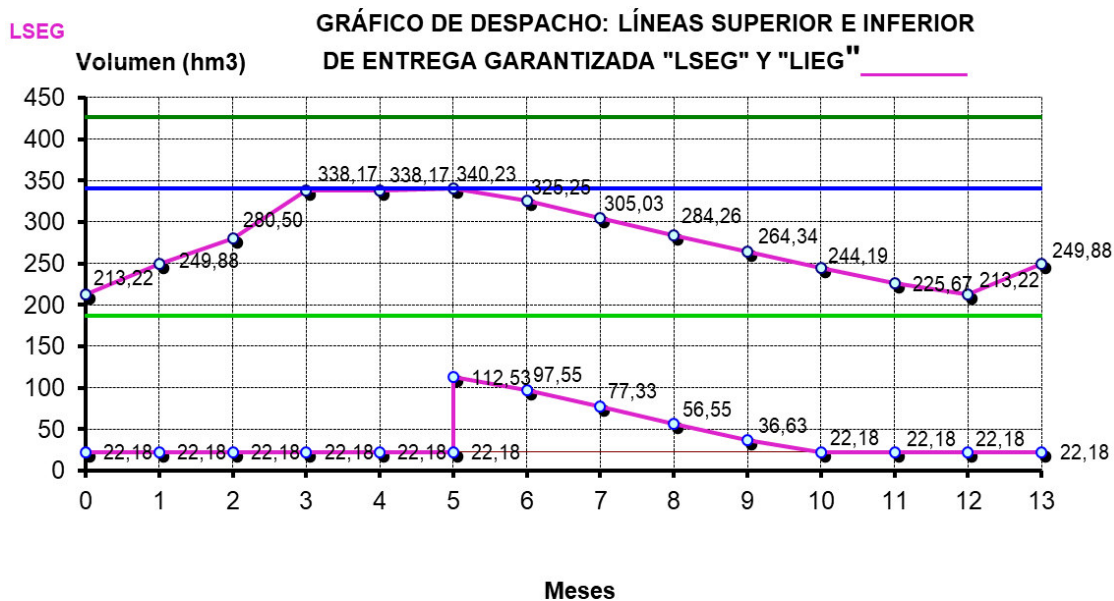


Figura 31. Gráfico de despacho del embalse

El Cuadro 51 resume las secuencias de las coordenadas de la línea superior e inferior de entrega garantizada, así como también la secuencia de la curva guía simulada, expresadas en hm³ por cada mes, además de los porcentajes de relación mensual para el cálculo de los sesgos estadísticos conformado por el intervalo de confianza entre la correlación de la curva guía estimada y la línea superior de entrega segura, información necesaria para el gráfico de despacho y diagrama de sensibilidad. (Figura 31 y Figura 32).

4.2. Discusión

La pérdida de la capacidad de almacenamiento es muy común en los embalses ocasionado por la acumulación de sedimentos, pese a todas las medidas previstas en el diseño de las presas para almacenar azolvamiento, las condiciones del suelo provocan que la acumulación sobrepase el límite establecido de manera precipitada, teniendo como consecuencia la disminución del volumen efectivo de los embalses.

La capacidad de almacenamiento del embalse La Esperanza se ve afectada por la deforestación de los bosques, debido al cambio de uso de suelo, ocasionado por el avance de la frontera agrícola, además las pendientes muy pronunciadas que, al unirse con las precipitaciones intensas, ocasionan el arrastre del suelo por acción de la gravedad, aumentando el depósito de los sedimentos que disminuye paulatinamente la capacidad de almacenamiento.

El ramal de la parte alta de la microcuenca de Membrillo y Bejuco, que aportan al embalse La Esperanza tienen una geomorfología de gargantas de valles encañonados (Anexo 4.3) con pendientes mayores al 46,63 % (Anexo 6) , compuestos de suelos francos (Cuadro 6) procedentes de lutitas, limolitas y areniscas tobáceas (Anexo 4.8). Cataño (2015) alega que la erosión de las pendientes y traslado de sedimentos se relacionan directamente a las propiedades del suelo y su morfología, por otra parte Quiroz (2018) en su investigación sobre la degradación específica y emisión de sedimentos en cuencas describe que, a partir de los 25 grados (46,63%) de inclinación de laderas, el suelo se vuelve inestable propenso a deslizamientos, contrastando estas alegaciones. La cuenca aportante al embalse La Esperanza en la parte alta de la microcuenca de Membrillo y Bejuco mediante el análisis de secciones transversales en el modelo de elevación digital de la cuenca en estudio, determinó el porcentaje de pendientes con valores que alcanzan hasta el 50,17 % (Anexo 6), porcentajes que implican que la principal característica superficial que ha influido en el azolvamiento en dos de las cabeceras del embalse La Esperanza son los relieves muy pronunciados, unido a esto la deforestación la hacen aún mucho más vulnerables.

Cruz *et al.*, (2015) asegura que los Sistemas de Información Geográfica son una alternativa de relevancia en los estudios de parámetros morfométricos, ya que el procesamiento de información digital, en especial de un modelo digital de elevación es útil y práctico para analizar características de un ambiente geomorfológico, permitiendo evaluar el funcionamiento hidrológico y descripción de una cuenca en forma sistematizada y coherente.

Para determinar los valores de todas estas variables, fue necesario descomponer el sistema en sus partes más esenciales, partiendo de lo general a lo particular, basados en trabajos previos hechos por el investigador y ratificadas por estudios de autores como Chen (2007), Campos (1998), Villamizar (1989) entre otros, determinando las características fisiográficas de toda la cuenca aportante al embalse La Esperanza. Conjuntamente a esto se estimaron los valores actuales del volumen del embalse a diferentes cotas y superficies, a través de una batimetría realizada en el vaso del embalse que concluyó en la ecuación polinómica cota-volumen y viceversa.

Moreira (2015) aplicando el modelo HadCM3, en el contexto de cambio climático, identificó en sus periodos de proyección altos incrementos de precipitación en la cuenca del río Portoviejo. Por otra parte Bravo (2017), aplicando el modelo GISS AOM sobre la misma cuenca de análisis de Moreira, corrobora una correlación positiva entre los dos métodos o modelos climatológicos globales siendo compatibles aproximadamente perfecta o absoluta, en la variable de precipitación y de la misma manera con la temperatura, pero ésta última con un nivel poco inferior. En la cuenca aportante al embalse La Esperanza colindante a la cuenca alta del río Portoviejo, se ha observado también un aumento en el análisis de la proyección de la precipitación y temperatura utilizando el modelo climático HadCM3.

La curva guía cumple con diversas obligaciones en la operación del embalse, tanto las correspondientes a temas ambientales tales como el caudal ecológico en los niveles mínimos del río, necesarios para conservar de la biota, el resguardo de avenidas máximas de caudales en el control de

inundaciones que pueden causar problemas de salubridad en los cascos urbanos por reboses de alcantarillados sanitarios en la salud pública y pérdidas de cultivos en la producción agrícola, entre las principales, además de las “dosificaciones de los caudales en la demanda y oferta hídrica en el aprovechamiento eficiente del embalse” (Bedoya y López, 2015).

De la misma forma, Bedoya y López (2015) y Recio *et al.* (2016), coinciden que llevar una gestión de un embalse a través de una curva guía mediante un modelo de sistema dinámico, introduciendo datos hidrológicos del embalse, permite decidir cuándo verter o no verter dependiendo de las condiciones externas de determinada situación o problema ayudando a obtener resultados prácticos y efectivos para la operación del embalse con el propósito de maximizar su eficiencia.

Como bien lo expresa Sánchez (2017), los sistemas cambian con el paso del tiempo debido a la variación del clima que la condicionan, es decir que no permanecen estáticos sino más bien dinámicos ya que interactúan con todos los conglomerados de fuerzas naturales y antropogénicas que las rodean. Ajustado a lo que fundamentan Ortiz y Maneiro (2006), en la que un sistema puede ser modelado a través de operaciones si se conoce tras un profundo análisis toda su información y sus aspectos más esenciales, con el fin de reelaborarla o recrearla bajo las condiciones que se requieran en un programa o software especializado.

Por lo tanto, recrear las condiciones de los sistemas naturales no suele ser fácil, mucho más si se trata de sistemas como una cuenca hidrográfica, en la que el número de variables a considerar puede ser extenso, no diagnosticable o carente de la suficiente información para realizar un diagnóstico completo, tal y como opina García (2016), sumando a esto que en algunos casos hay que levantar información base desde el inicio, no contando con recurso tiempo en muchos de los procesos, por lo que no se llega a desarrollar eficientemente modelos que contribuyan al aprovechamiento sostenible de los recursos naturales especialmente los hídricos.

4.3. Prueba de hipótesis

Los resultados de la simulación dinámica de la curva guía de operación obtenida en el programa Microsoft Excel 2016 se contrastaron con el método estadístico de Kritski y Menkel del componente teórico, en el cual se realizó una interacción de todos los volúmenes obtenidos de cada mes del año en la secuencia de la curva guía “simulado” y la línea superior de entrega segura “teórico”, obteniendo valores en función de los parámetros estadísticos PBIAS, NSE y RSR, que resumido en el diagrama de sensibilidad de interpretación de los parámetros estadísticos teórico-simulado arrojaron los siguientes resultados: El PBIAS igual a -4,51 valor comprendido entre +/- 10,00; el NSE igual a 0,998 valor entre el rango 0,75 y 1,0; por último el RSR que fluctúa entre 0 a 0,50 con un valor calculado de 0,049, resultados que prueban y validan estadísticamente la hipótesis general, correspondiente a una interpretación de modelo como muy bueno. De esta forma el modelo llena las expectativas de comportamiento permitiendo tomar decisiones adecuadas en la planificación eficiente del sistema tomando en cuenta los eventos climáticos extremos no esperados y ajustes a las precipitaciones observadas, siendo una herramienta útil para la administración del recurso hídrico del embalse La Esperanza, además de herramienta de utilidad metodológica práctica para otros embalses.

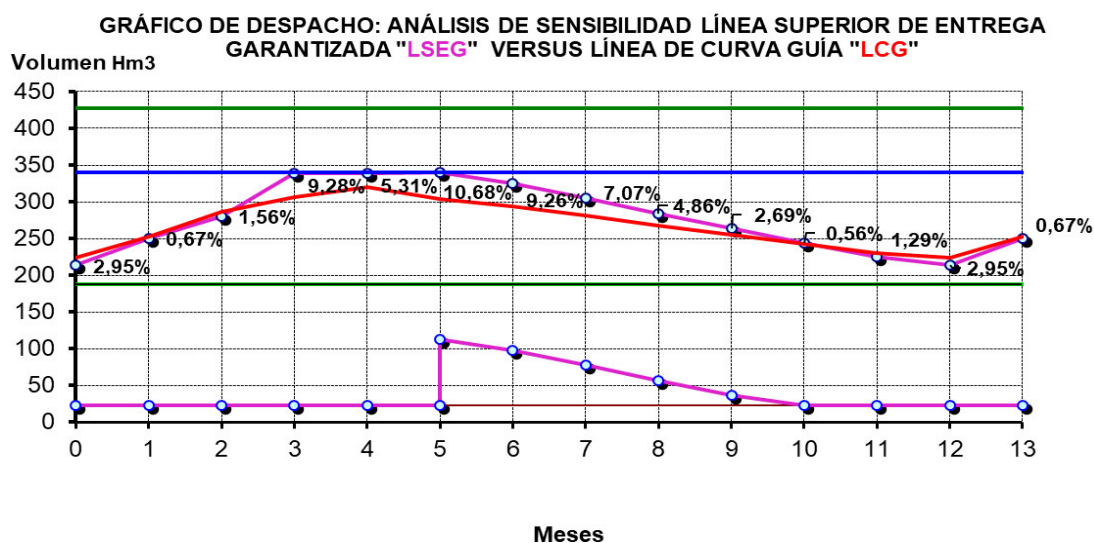


Figura 32. Diagrama de sensibilidad

CONCLUSIONES

- La caracterización superficial del área en estudio permitió conocer el estado actual de la cuenca aportante al embalse La Esperanza: Su área: 428,50 km², sus microcuencas aportantes: Carrizal, Membrillo, Bejuco y Cañas, su composición geológica es de lutitas y limolitas del periodo mioceno/plioceno y areniscas tobáceas del periodo plioceno (Anexo48), sus elevaciones: entre 25 a 559 m.s.n.m. y sus formas geomorfológicas: vertientes regulares y mesas muy disectadas en su mayoría; en el embalse La Esperanza: Capacidad de almacenamiento a diferentes cotas mediante la obtención de la ecuación polinómica de segundo grado: $V = 0,3092c^2 - 17,889c + 260,78$ (Ecuación 4.1) y el porcentaje de azolvamiento del embalse 5,79% en 22 años de funcionamiento de la presa (1997-2018), producido principalmente por el relieve con pendientes muy pronunciadas como la principal característica superficial influyente en las cabeceras de Membrillo y Bejuco. Son las características geomorfológicas, texturales del suelo y cubierta vegetal de la que está compuesta la cuenca, la que amortigua en buena parte la acumulación de sedimento en el embalse La Esperanza.
- De la información histórica de 50 estaciones pluviométricas de la zona de influencia al área de estudio, en 38 años analizados (1980 - 2017); se obtuvo una base de datos, en función del método de isoyetas, que revelaron lo siguiente: Precipitación menor 741,79 mm en el año 2013, precipitación mayor 5094,68 mm en el año 1997, y precipitación promedia real observada de 1742,42 mm. La aplicación de las constantes de anomalía del modelo climático global HadCM3, a la precipitación media real observada, hizo posible las estimaciones de precipitaciones medias en tres periodos: En el periodo 2010-2039 una precipitación media de 2077,49 mm, representando un aumento de 18,06%, en el periodo 2040-2069 una precipitación media de 2535,89 mm representando un aumento de 44,11% y en el periodo 2070 – 2099

una precipitación media de 2961,62 mm que representa un aumento de 68,31% en función de la precipitación media real observada histórica, siempre y cuando se mantengan la línea de tendencia actual de calentamiento global. La data histórica, permite generar escenarios a largo plazo en el incremento paulatino de la precipitación, sin embargo, esto está asociado a una fuerte evapotranspiración y la presencia de eventos extremos los que modificarían el funcionamiento ecosistémico.

- Mediante un balance hídrico de regulación digital que incorporó ecuaciones de proyecciones pluviales mensuales, ecuaciones de evapotranspiración potencial, caudales de entrada, caudales de salida y restricciones de funcionamiento del embalse, se simuló tres escenarios posibles en mínima, media y máxima precipitación sobre la cuenca aportante al embalse La Esperanza, obteniendo volúmenes mensuales acumulados que a través de la ecuación polinómica cota-volumen $c = -0,0001 V^2 + 0,1148 V + 35,557$ (Ecuación 4.2) se determinó la secuencia de las curvas guías óptimas en el aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza en los tres escenarios de regulación propuestos. La combinación del conjunto de ecuaciones, permitió elaborar el modelo y obtener la secuencia de curva guía media; cumpliendo el propósito del embalse, el de la regulación óptima del recurso hídrico, monitoreado en los meses de noviembre y diciembre del 2018.
- En el análisis de la data histórica de la cuenca aportante al embalse La Esperanza se garantiza un 85% de escurrimiento de entrega por lluvias, equivalente a un volumen de 241,81 Hm³ por año, teniendo en cuenta que el volumen de entrega anual real de demanda garantizada es de 448,52 Hm³; el déficit de 206,71 Hm³ es cubierto mediante el abastecimiento del embalse Daule Peripa, el cual actúa como una boya de salvación en el sistema del balance hídrico.
- En el análisis de sensibilidad e interpretación de los parámetros estadísticos para la validación del modelo se concluye que el PBIAS está en el orden de -4,51 entre +/-10.00, el NSE es de 0,998, valor

comprendido entre 0,75 y 1,0; por último, el RSR fluctúa entre 0 a 0,50 con un valor calculado de 0,049, en consecuencia el presente modelo que se reduce a una curva guía media y validado con el método de Kritski y Menkel correspondió a una interpretación muy buena del modelo. Con estos resultados es seguro traslapar y aplicar este modelo en embalses con características de superficie, clima y ecosistema semejantes a la cuenca aportante al embalse La Esperanza.

RECOMENDACIONES

- A la institución a cargo del manejo del embalse, realizar la gestión integral continua en la parte forestal de la cuenca aportante al embalse La Esperanza con énfasis en la microcuenca alta de Membrillo y Bejuco, con la finalidad de promover el sustento económico-ambiental de la población y reducir al mínimo el aumento de azolvamiento en la vida útil del embalse.
- Implementar en la cuenca aportante del embalse La Esperanza y en la zona de influencia, un sistema de estaciones meteorológicas automáticas.
- Aplicar un sistema SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos), que permita interactuar en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores) conjuntamente con las necesidades, eventualidades y complicidad de la curva guía de operación, de tal forma que permita afrontar de manera eficaz sucesos extraordinarios y mitigar el impacto negativo en el ambiente por sequías e inundaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, F. (1999). Fundamentos de hidrología de superficie (8. reimpr). México: Limusa Noriega Ed.
- Aracil, J. (1992). Introducción a la dinámica de sistemas. Madrid: Alianza Editorial.
- Campos, D. (2002). Ajuste de la distribución bog-Pearson tipo por medio de optimización numérica no restringida. Ingeniería Hidráulica Mexico, 17(4), 115-128.
- Arnold, M., & Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. 1, 40-49.
- Arnold, M. y Rodríguez, D. (1990). El Perspectivismo en la Teoría Sociológica. Estudios Sociales. 2(64), 27-41.
- Arreguín, F. y López, M. (2016). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. Tecnología y Ciencias del Agua, 7(5), 5-13.
- Banks, J. Carson, J. y Nelson, B. (1996). Discrete event system simulation.
- Bedoya, V. y López, J. (2015). Modelo para el Control de Inundaciones durante el Fenómeno De «La Niña» Utilizando un Embalse Hidroeléctrico. Información Tecnológica, 26(2), 89-100.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000200011>
- BioManabí. (2012). La Esperanza. Crónica de una tragedia anunciada. Recuperado de <https://romoced.wordpress.com/>
- Boccardo, A. Barulich, N. Dardati, P. Celentano, D. (2016). Análisis de Sensibilidad de Modelos Matemáticos. Mecánica Computacional, 18, 3555.
- Bravo, G. (2017). Predicciones de precipitación y temperatura del modelo climático global GISS AOM 4x3 para la cuenca hidrográfica del río Portoviejo (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”, Calceta, Ecuador.
- Bravo, J., Collischonn, W., Pilar, J., & Depettris, C. (2006). Técnica de parametrización, simulación y optimización para definición de reglas de operación en represas. Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.

- Breneman, J. E. (1997). Simulation Made Easy, a Manager's Guide. *Technometrics*, 39(4), 431-431.
<https://doi.org/10.1080/00401706.1997.10485173>
- Caballero, J. (2011). Las avenidas torrenciales: Una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestión y ambiente*, 14(3), 45-50.
- Cabrera, E. (2007). Solución de los problemas de regulación anual e hiperanual para el caso de embalse simple utilizando la función LINPROG del asistente matemático MATLAB. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 18(2).
- Cabrera, E. (2019). Maestría de Hidráulica. Territorio y ambiente: Universidad Técnica de Manabí UTM.
- Cáceres, L. (2001). Cambio Climático Quito, Ecuador: Comité Nacional sobre el Clima, el Ministerio del Ambiente y Proyecto ECU/99/G31 Cambios Climáticos.
- Campos, A., Konstantinovich, E., & Igorevich, I. (2016). Hidraulica e Hidrologia Para Ingenieria. Moscú, Rusia. . Universidad de Rusia de la amistad de los pueblos.
- Campos, D. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Carson, J. S. (2004). Introduction to Modeling and Simulation. *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, 2004., 1, 5-12.
<https://doi.org/10.1109/WSC.2004.1371297>
- Cartwright, N. (1999). Models and the limits of theory: Quantum Hamiltonians and the BCS models of superconductivity. En M. Morrison & M. S. Morgan (Eds.), *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 241-281).
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511660108.010>
- Cataño, 2015. Modelo conceptual agregado de transporte de sedimentos para cuencas de montaña en Antioquia. Tesis. Magíster en Ingeniería-Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas.

- CAZALAC/RODHOS. (2006). Aplicación de metodologías para determinar la eficiencia de uso del agua estudio de caso en la región de Coquimbo. (BTEL-CD-149). Recuperado de <http://bibliotecadigital.ciren.cl>
- Cellier, F. E. (1991). Continuous System Modeling. Recuperado de <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3085921>
- CEPAL. (2008). Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: Una reseña (p. 148).
- Chang, F.-J., Chen, L., & Chang, L.-C. (2005). Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes*, 19(11), 2277-2289. <https://doi.org/10.1002/hyp.5674>
- Chen, L. (2007). Real coded genetic algorithm optimization of long term reservoir operation. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(5), 1157-1165. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2003.tb03699.x>
- Choquehuanca, A. (1999). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Lucre. (11), 21.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1964). *Applied hydrology* ([Nachdr.], internat. ed. 1988). New York: McGraw-Hill.
- Cruz, B., Gaspari, F., Rodríguez, A., Carrillo, F. M. C., & Téllez, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23(64), 26-34.
- De la Peña, G., & Velázquez, R. M. (2018). Algunas reflexiones sobre la teoría general de sistemas y el enfoque sistémico en las investigaciones científicas. *Revista Cubana de Educación Superior*, 37, 31-44.
- Delipetrev, B. (2016). Nested algorithms for optimal reservoir operation and their embedding in a decision support platform. IHE Delft Institute for Water Education, Delft.
- Díaz, D. P., & Torres, D. G. C. (2011). La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: Estado actual y ante escenarios de cambio climático. (75), 37-50.
- Dibike, Y. B., & Coulibaly, P. (2005). Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: Comparison of downscaling methods and

- hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 307(1-4), 145-163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.012>
- Ehsani, N., Vörösmarty, C. J., Fekete, B. M., & Stakhiv, E. Z. (2017). Reservoir operations under climate change: Storage capacity options to mitigate risk. *Journal of Hydrology*, 555, 435–446. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.09.008
- Farfán, F., Urbina, L., Ferreira, S., & Brandan, M. (2010). Caracterización y Red de Drenaje de la Subcuenca del Río Tin-Tin, PN. Los Cardones, Salta. 5(16), 9-21.
- Fearnside, 2005 P.M. Fearnside Do Hydroelectric Dams Mitigate Global Warming? The Case of Brazil's CuruÁ-una Dam Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang., 10 (2005), pp. 675-691, 10.1007/s11027-005-7303-7
- Fernández, N. (2013). El relieve II. Recuperado de https://issuu.com/maixu61/docs/el_relieve_ii
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547-1578. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- Frodeman, R. (Ed.). (2010). *The Oxford handbook of interdisciplinarity* (Second edition). Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- Galison, P. (1997). *The Disunity of Science: Boundaries, Contexts, and Power* (Vol.33). [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6696\(199722\)33:3<261::AID-JHBS4>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6696(199722)33:3<261::AID-JHBS4>3.0.CO;2-U)
- García, R., & Pérez, A. (2005). La sequía, un fenómeno climático. *Papeles de geografía*, 41(42), 239-242.
- García, W. (2016). *El sistema complejo de la cuenca hidrográfica (Maestría)*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Geraldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2010). Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones Geográficas*, (52), 215-225. <https://doi.org/10.14198/INGEO2010.52.08>
- González, M. (2010). Escorrentías. Recuperado de <http://ocw.upm.es>

- Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.
- Graham, L. P. (2004). Climate Change Effects on River Flow to the Baltic Sea. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 33(4), 235–241. doi:10.1579/0044-7447-33.4.235
- Guillemot, H. (2010). Connections between simulations and observation in climate computer modeling. Scientist's practices and "bottom-up epistemology" lessons (Vol. 41).
<https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.07.003>
- Harrell, C., & Tumay, K. (1995). *Simulation Made Easy: A Manager's Guide*. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=siFrQgAACAAJ>
- Harrington, J., & Tumay, K. (1999). *Simulation Modeling Methods* / H.J. Harrington, K. Tumay.
- Heras, Rafael. (1976). *Hidrología recursos hidráulicos*. Madrid: Dirección General de Obras Hidráulicas, Centro de Estudios Hidrográficos. /z-wcorg/.
- Herrera, O. J., & Becerra, L. A. (2014). *Diseño General de las Etapas de Simulación de Procesos con Énfasis en el Análisis de Entrada*. 10.
- Horton, R. E. (1933). The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14(1), 446.
<https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Humphreys, P. (2004). *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method* (Vol. 5).
<https://doi.org/10.1007/BF00974980>
- Huntington, T. G. (2010). Climate Warming-Induced Intensification of the Hydrologic Cycle. En *Advances in Agronomy* (Vol. 109, pp. 1-53).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385040-9.00001-3>

- IPCC. (2002). Resumen para responsables de políticas, Informe especial del IPCC (p. 24). Recuperado de <https://www.ipcc.ch>
- IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- IPCC (Ed.). (2013). Climate change 2013: The physical science basis ; summary for policymakers, a report of Working Group I of the IPCC, technical summary, a report accepted by Working Group I of the IPCC but not approved in detail and frequently asked questions ; part of the Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. EMPIRIA. Revista de Metodología de las Ciencias Sociales, (16), 85-112. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=297124024004>
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. 19, 41-68.
- Johnson, A., & Lenhard, J. (2011). Toward a new culture of prediction: Computational modeling in the era of desktop computing.
- Kang, B., Lee, S.-J., Kang, D.-H., & Kim, Y.-O. (2007). A flood risk projection for Yongdam dam against future climate change. Journal of Hydro-Environment Research, 1(2), 118–125. doi:10.1016/j.jher.2007.07.003
- Keller, E. (Ed.). (2003). The Philosophy Of Scientific Experimentation. <https://doi.org/10.2307/j.ctt5hjsnf>
- S. Kim, Y. Tachikawa, E. Nakakita, TAKARA, K.Reconsideration of reservoir operations under climate change: case study with Yagisawa Dam Japan. Annu. J. Hydraul. Eng. JSCE, 53 (2009), pp. 115-120
- Klyatskin, V. I. (Ed.). (2005). Bibliography. En Dynamics of Stochastic Systems (pp. 200-203). <https://doi.org/10.1016/B978-044451796-8/50014-8>

- Law, A. M., & Kelton, W. D. (1991). Simulation modeling and analysis (2nd ed). New York: McGraw-Hill.
- Legates, D. R., and G. J. McCabe. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35(1): 233-241.
- Li, S. (2013). Adaptive multi-reservoir-based flood control and management for the Yellow River: Towards a next generation software system. CRC /Balkema, Leiden.
- Llerena, C. A. (2003). *Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú. Presentado en Foro Regional sobre Sistemas de Pago por Servicios Ambientales (PSA). Conferencia llevada a cabo en el Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas FAO, Arequipa, Perú.
- López, F. (2015). La simulación y representación de modelos y teorías científicas mediante imágenes. *Thémata Revista de Filosofía*, 1(51), 271-288. <https://doi.org/10.12795/themata.2015.i51.14>
- Maass, Manuel, & Colter, H. (2007). Protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas. El manejo integral de cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental.
- Márdero, S., Nickl, E., Schmook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., & Lawrence, D. (2012). Sequias en el sur de la península de Yucatán: Análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones Geográficas*, (78), 19-33. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000200003&nrm=iso
- Martin, L. (1997). Mistakes and Misunderstandings: Table Functions.
- Medellín, Azuara, JJ Harou, MA Olivares, K. Madani, JR Lund, RE Howitt, SK Tanaka, MW Jenkins, T. 2008. Adaptabilidad y adaptaciones del sistema de suministro de agua de California al calentamiento del clima seco *Clim. Cambiar*, 87 (2008), pp. 75 - 90, 10.1007 / s10584-007-9355-z

- Mejía, A. (2006). Hidrología Aplicada. Lima, Perú: Q&P Impresiones S.R.L.
- Mejía, A. (2012). Hidrología aplicada (1.a ed.). Perú: Q&P Impresiones S.R.L.
- Montaño, D; Solórzano, J. Variabilidad entre los suelos de uso forestal y ganadero del sitio Zapote, cantón Bolívar, provincia de Manabí. Tesis Ingeniería en medio ambiente. EC. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.
- Moradkhani, H., Baird, R. G., & Wherry, S. A. (2010). Assessment of climate change impact on floodplain and hydrologic ecotones. *Journal of Hydrology*, 395(3-4), 264-278.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.038>
- Moreira, G. (2015). Predicciones de precipitación y temperatura del modelo climático global HADCM3 para la cuenca hidrográfica del río Portoviejo (Tesis pre grado Ingeniero en Medio Ambiente). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López, Calceta, Ecuador.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van-Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. Veith, T.L. (2007): “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations”. *Transactions of the ASAE*, vol. 50, p.885–900.
- Morrison, M., & Morgan, M. S. (1999). Models as mediating instruments. En M. Morrison & M. S. Morgan (Eds.), *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science* (pp. 10-37).
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511660108.003>
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3): 282-290.
- Ochoa, T. (2011). Hidráulica de ríos y procesos morfológicos (1.a ed.). Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Orsag, V. 2010. El recurso suelo. Principios para su manejo y conservación. 1 ed. Bol. Editorial Zeus. p 489.
- Ortiz, E. (2015). Definición de las reglas de operación hidráulica del embalse la Esperanza (maestría en recursos hídricos). Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental (FICA), Quito, Ecuador.

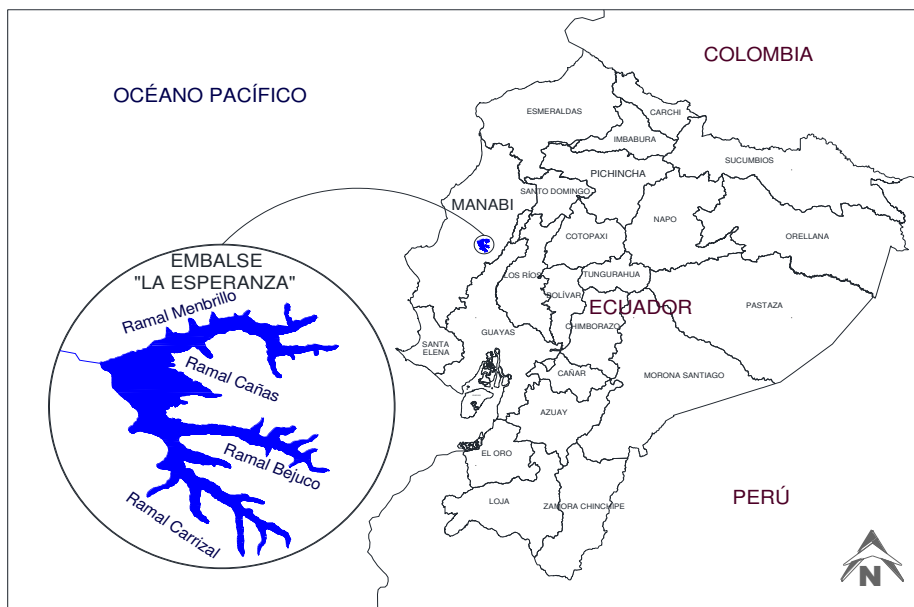
- Ortiz, F., & Maneiro, N. (2006). Dinámica de sistemas: otro enfoque para modelación y simulación en Ingeniería. 1(1), 6-14.
- Ortiz, O. (2015). Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos alto andinos y transferencia de información hidrometeorológica. Tecnología y ciencias del agua, 6, 25-44.
- Palmer, T. N., & Williams, P. D. (2008). Introduction. Stochastic physics and climate modelling. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 366(1875), 2419-2425. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0059>
- Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1992). Physics of climate. New York: American Institute of Physics.
- Plan Nacional del buen vivir, 2017. Presidencia de la república del Ecuador. <https://www.presidencia.gob.ec/>
- Peñafiel, J. (2012). Afectados por inundaciones piden una auditoría técnica en represa. Recuperado de El Universo website: <https://www.eluniverso.com/>
- PNUD, & MAE. (2009). Proyecto Adaptación al Cambio Climático a través de una Efectiva Gobernabilidad del Agua en el Ecuador (PACC). Recuperado de <http://www.ec.undp.org/content/ecuador/es/home.html>
- Quiroz, 2018. Evaluación de la degradación específica y emisión de sedimentos en la cuenca vertiente al embalse de Beniarrés (alicante). ES. Tesis Magister Ingeniería hidráulica y medio ambiente. Universidad Politécnica de valencia.
- Radder, H. (Ed.). (2003). The Philosophy Of Scientific Experimentation. <https://doi.org/10.2307/j.ctt5hjsnf>
- Recio, I., Niubis, P., & Martínez, J. (2016). Sistema para operación de embalse simple implementado en el asistente matemático MATLAB. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 37(1), 28-42.
- Renan, C. (2015). 7 STEPS TO BUILD A PROPER DISCRETE EVENT SIMULATION. Recuperado de <https://www.linkedin.com>
- Requena, D., & Segovia-Juárez, J. L. (2016). Sugerencias a partir del análisis de sensibilidad de un modelo matemático de transmisión de

- chikungunya. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 33(1), 154. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2016.331.2017>
- Ruiz, M. 2007. Curso de Estadística Básica, Inferencias Estadísticas II, Sección V. Fundación de la formación e investigación sanitaria de la region de Murcia. En sitio web: http://www.ffis.es/ups/Sesion_V_VI.ppt
- Sánchez, M. (1992). Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Logroño: Sociedad Española de Geomorfología Geomorfa.
- Sánchez, Monica. (2017). Los humanos cambian el clima 170 veces más rápido que las fuerzas naturales [Blog]. Recuperado de meteorología en red website: <https://www.meteorologiaenred.com>
- Seoane, M. E., Arriasecq, I., & Greca, I. M. (2015). Simulaciones computacionales: Un análisis fenomenográfico. 27, 9.
- Sismondo, S. (1999). Models, Simulations, and Their Objects (Vol. 12). <https://doi.org/10.1017/S0269889700003409>
- Tsanis, I., Koutroulis, A., Daliakopoulos, I., & Jacob, D. (2011). Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete. 106, 667-677. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0048-2>
- Tung, C., Hsu, S., Liu, C.-M., & Li, J.-S. (2003). Application of the genetic algorithm for optimizing operation rules of the Liyutan reservoir in Taiwan. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 39(3), 649-657. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2003.tb03682.x>
- UICN. (2009). Guía para la Elaboración de Planes de Manejo de Microcuencas (1.a ed.). San Marcos, Guatemala: Policolor.
- UNESCO, M. (1978). World Water Balance and Resources of the Earth. Recuperado de <http://www.unesco.org/>
- Villamizar, A. (1989). Diseño de presas de tierra para pequeños almacenamientos. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=4qXoGwAACAAJ>
- Watts, R. J., Richter, B. D., Opperman, J. J., & Bowmer, K. H. (2011). Dam reoperation in an era of climate change. *Marine and Freshwater Research*, 62(3), 321. doi:10.1071/mf10047

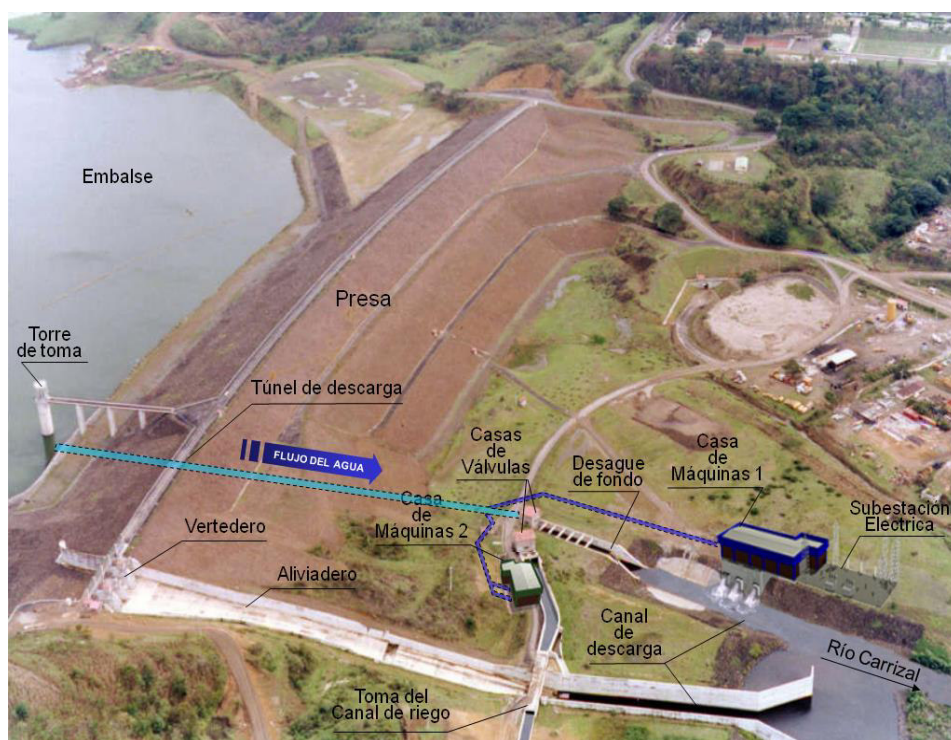
- Winsberg, E. (2010). Eric Winsberg: Science in the Age of Computer Simulation. *Minds and Machines*, 23(2), 251-254.
<https://doi.org/10.1007/s11023-012-9292-0>
- Winsberg, E., & Fine, A. (2003). Quantum Life: Interaction, Entanglement, and Separation. *The Journal of Philosophy*, 100(2), 80-97. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/3655793>
- Wurbs, R. A. (1996). Modeling and analysis of reservoir system operations. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR.
- Zambrano, J. (2012). Presa La Esperanza pasó a ser una desesperanza para 50 mil personas. Recuperado de El Universo website: <https://www.eluniverso.com>
- Zambrano, Y. (2014). Posibilidades de implementación de un sistema de indicadores para la gestión de sequías en la Demarcación Hidrográfica de Manabí-Ecuador (Tesis de Mestría, Politécnica de Valencia). Recuperado de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/1389>

ANEXOS

Anexo 1. Imágenes de la presa La Esperanza y sistema de embalse



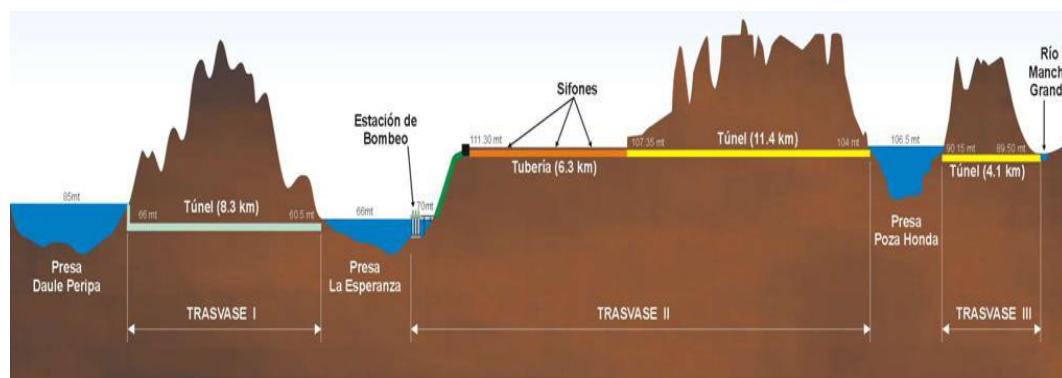
Ubicación del embalse "La Esperanza" **Fuente.** Velásquez, 2015



Vista aérea de la represa La Esperanza. **Fuente.** CRM, 2001



Vista en planta de los embalses con sus respectivos trasvases, en la provincia de Manabí. **Fuente.** CRM, 2001



Sección transversal de los embalses con sus respectivos trasvases, en la provincia de Manabí. **Fuente.** CRM, 2001

Anexo 2. Fotos aéreas de la represa La Esperanza



Vista aérea frontal 1



Vista área posterior 2



Vista de área posterior 1



Vista lateral 1



Vista área frontal 2



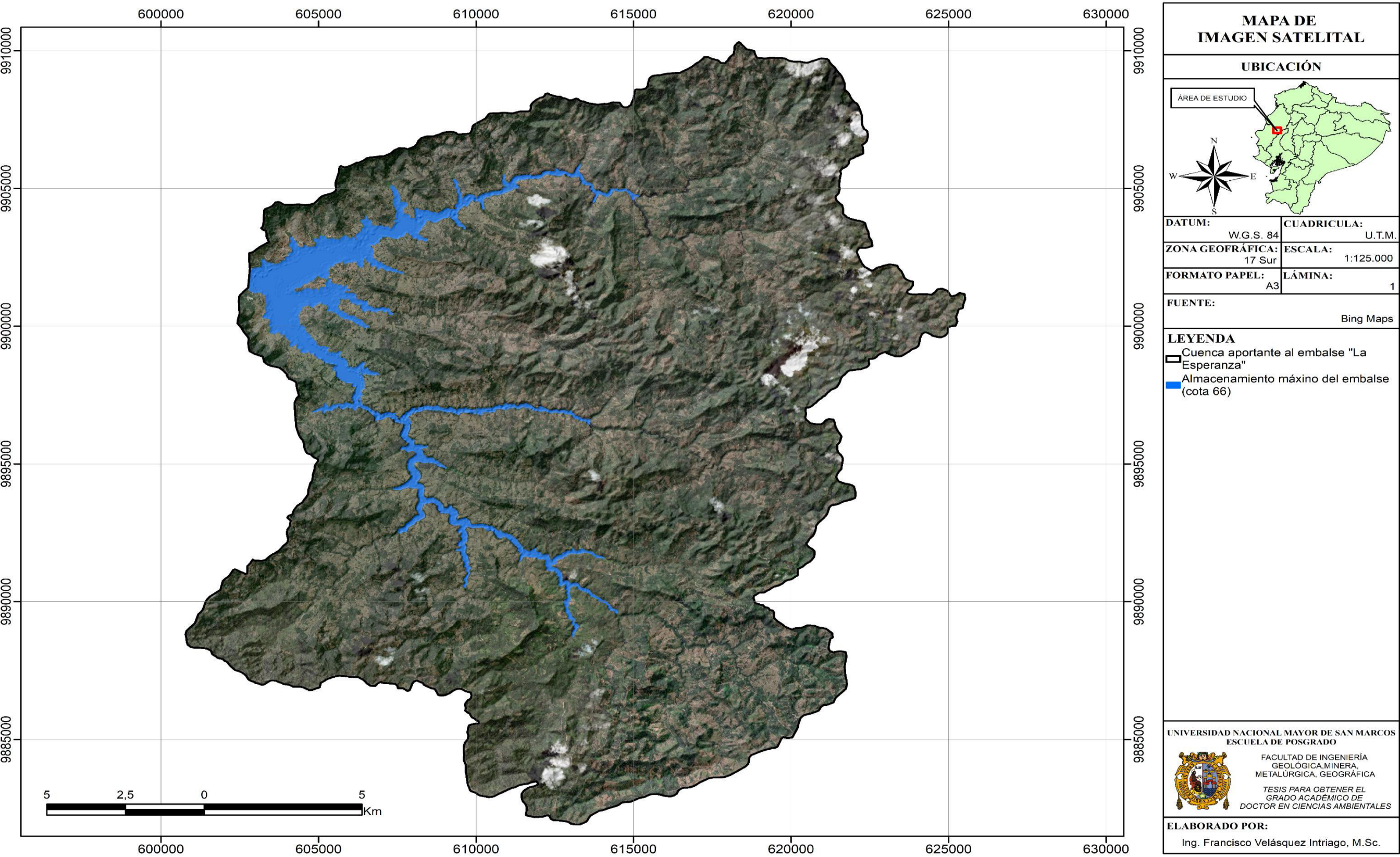
Vista lateral 2

Anexo 3. Fotos del levantamiento batimétrico en el embalse La Esperanza

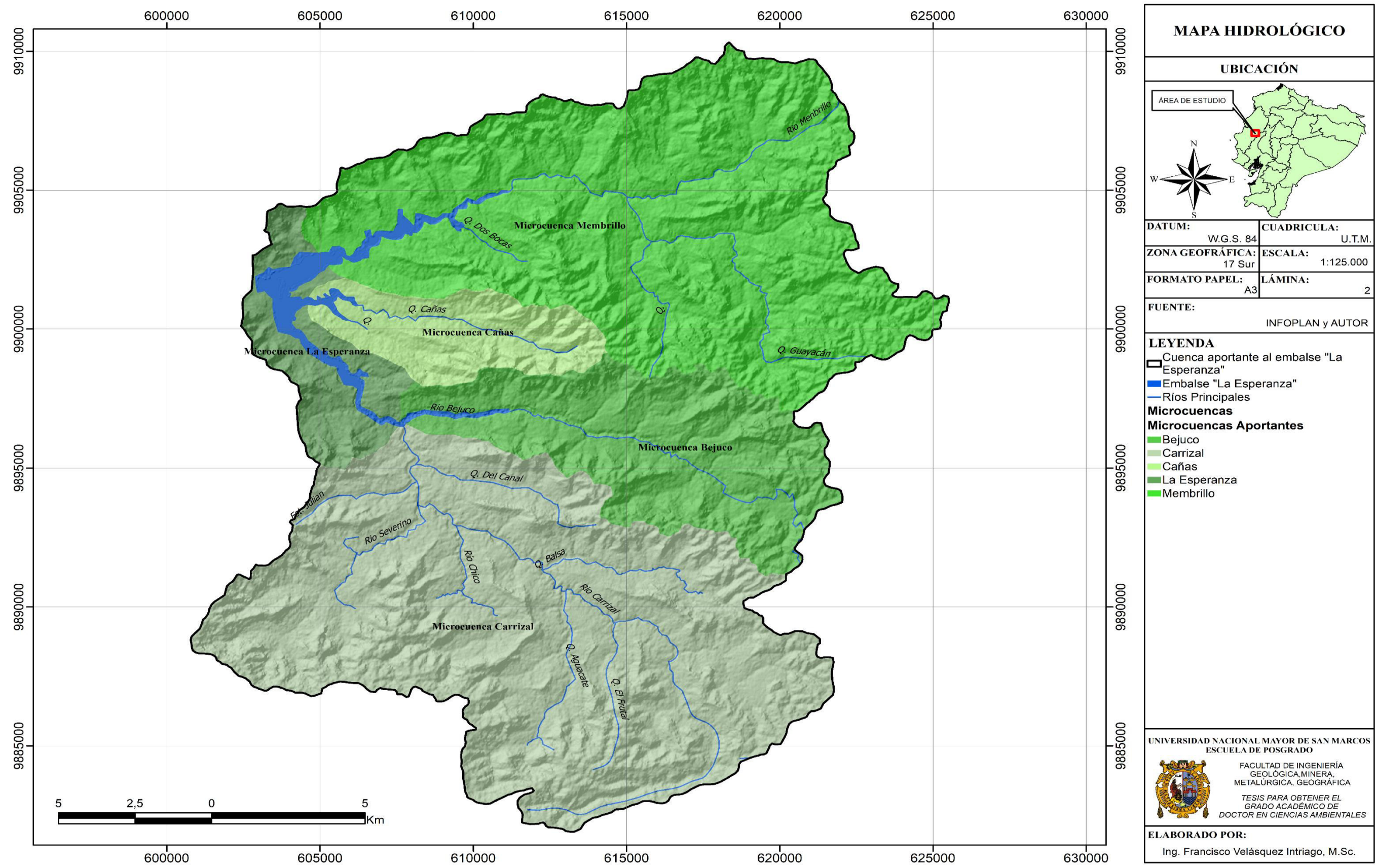


Anexo 4. Mapas temáticos de la cuenca aportante al embalse La Esperanza

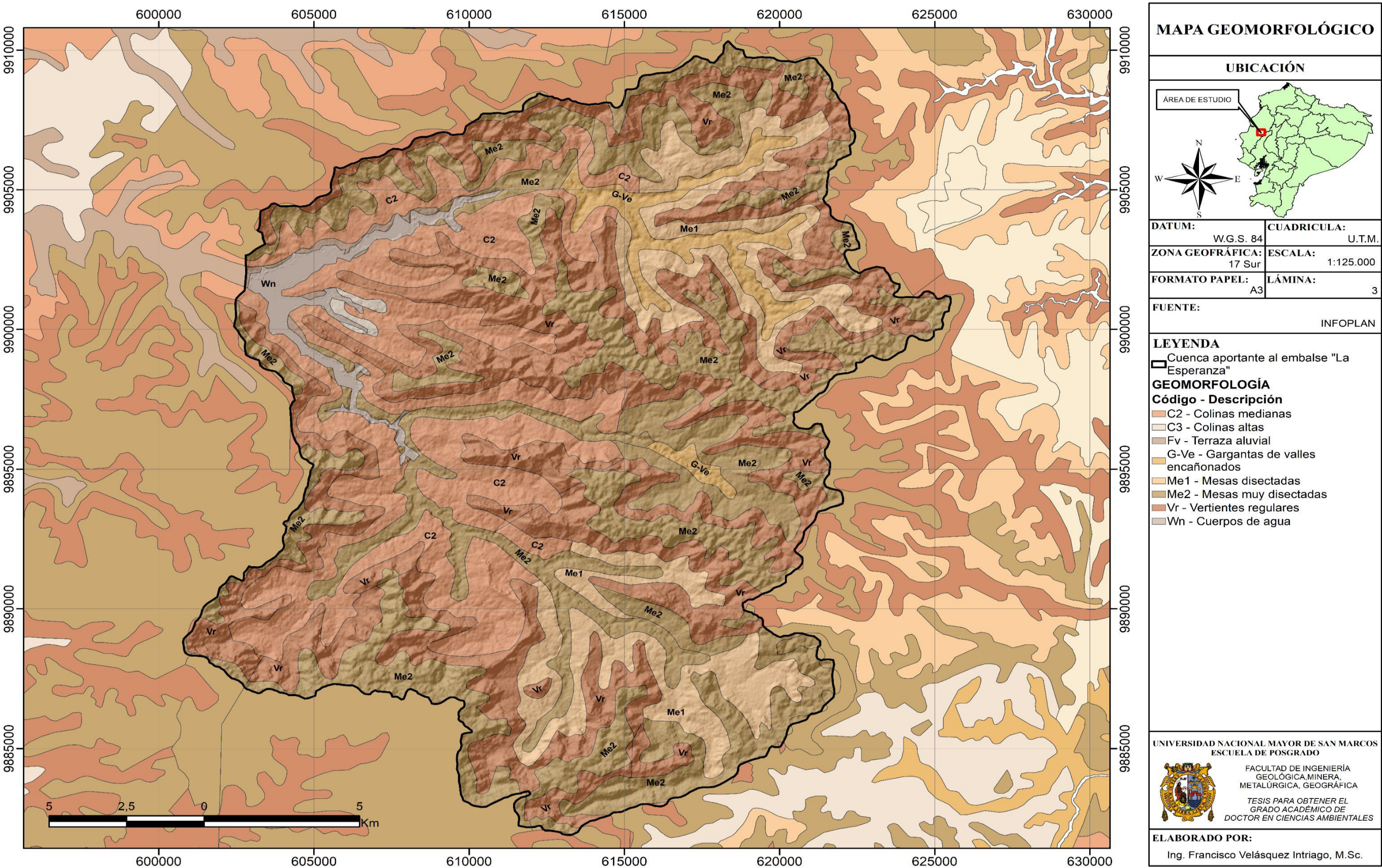
Anexo 4.1. Mapa satelital



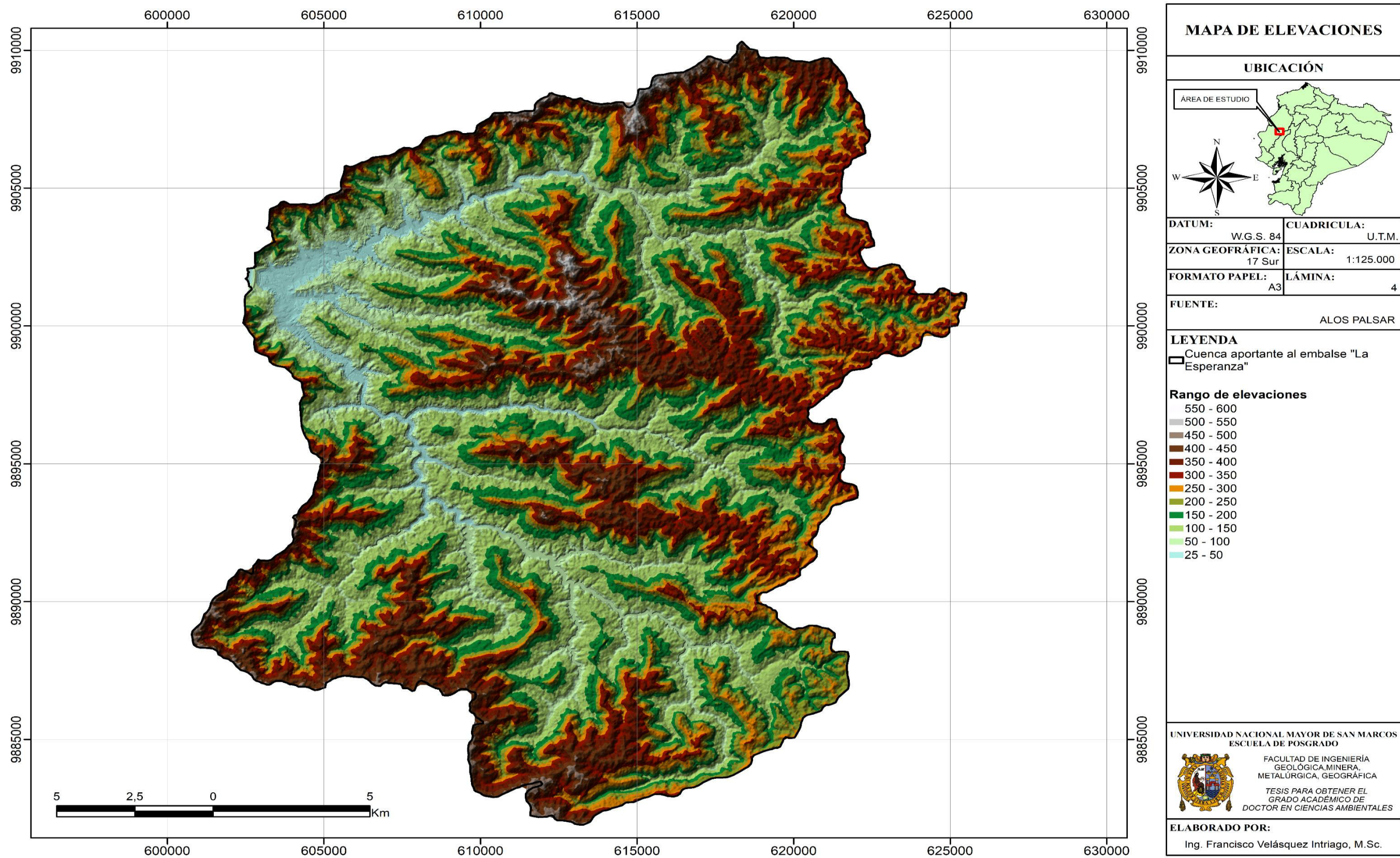
Anexo 4.2. Mapa de cuencas hidrográficas



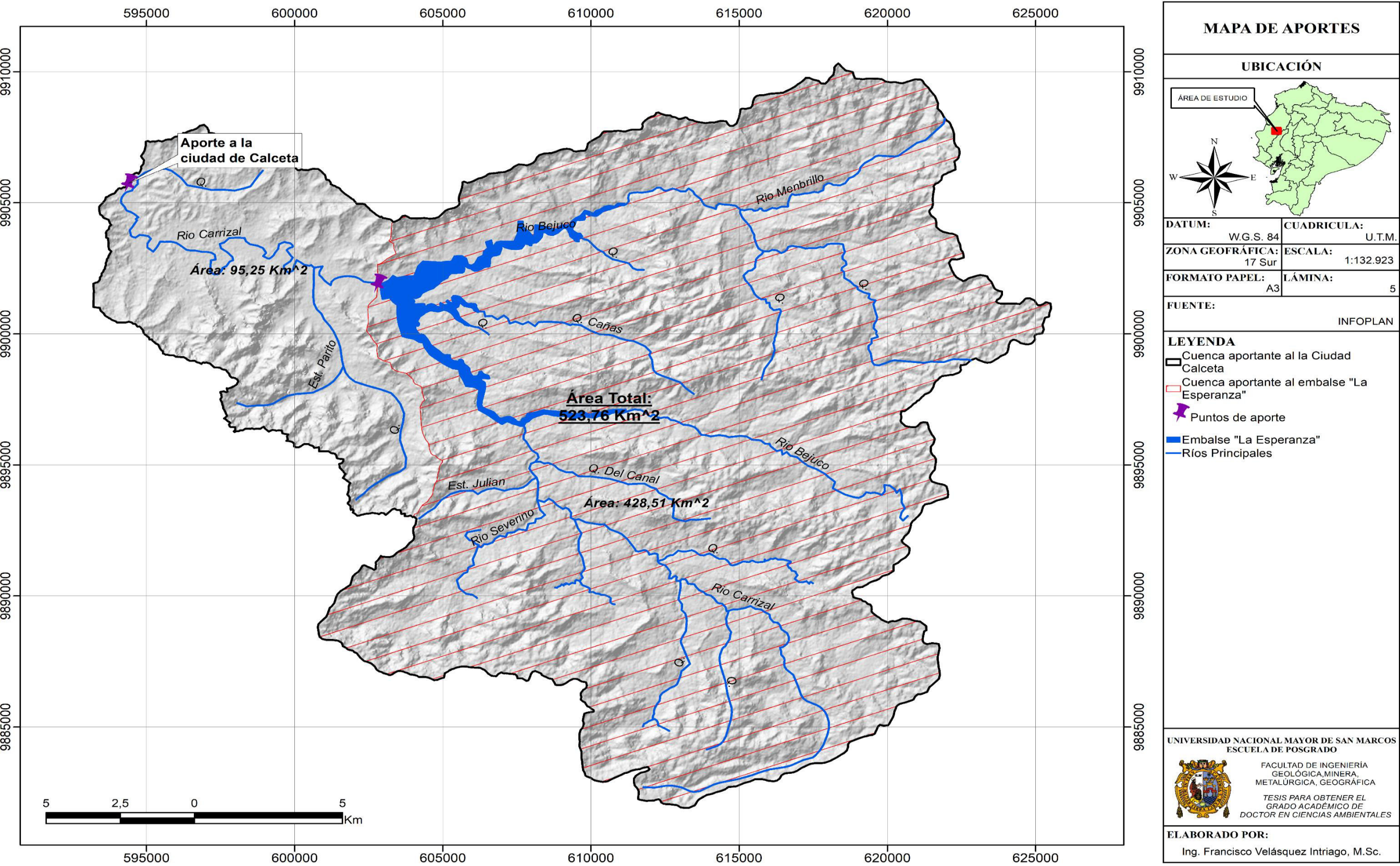
Anexo 4.3. Mapa Geomorfológico



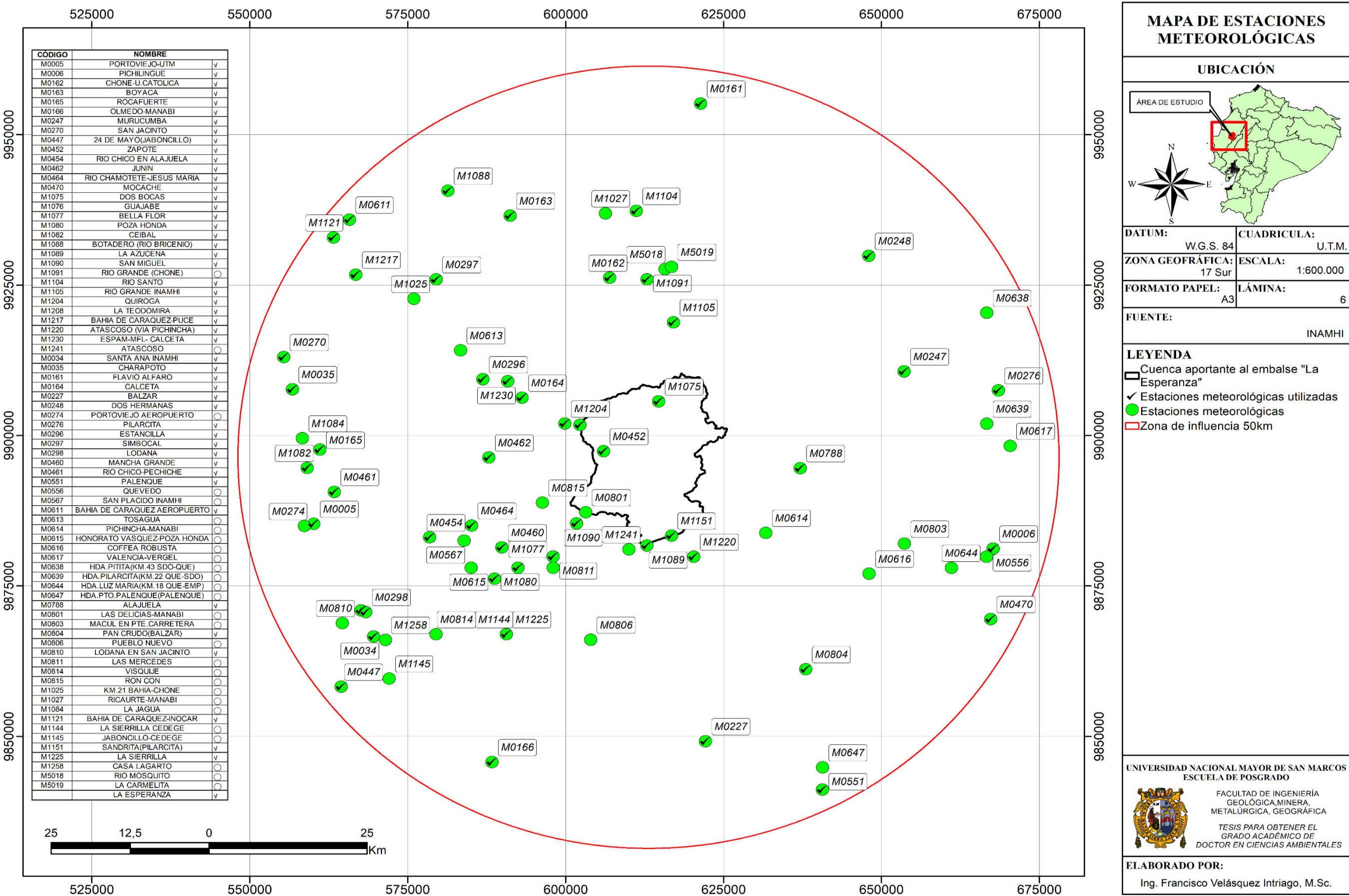
Anexo 4.4. Mapa: Modelo digital de elevación “DEM”



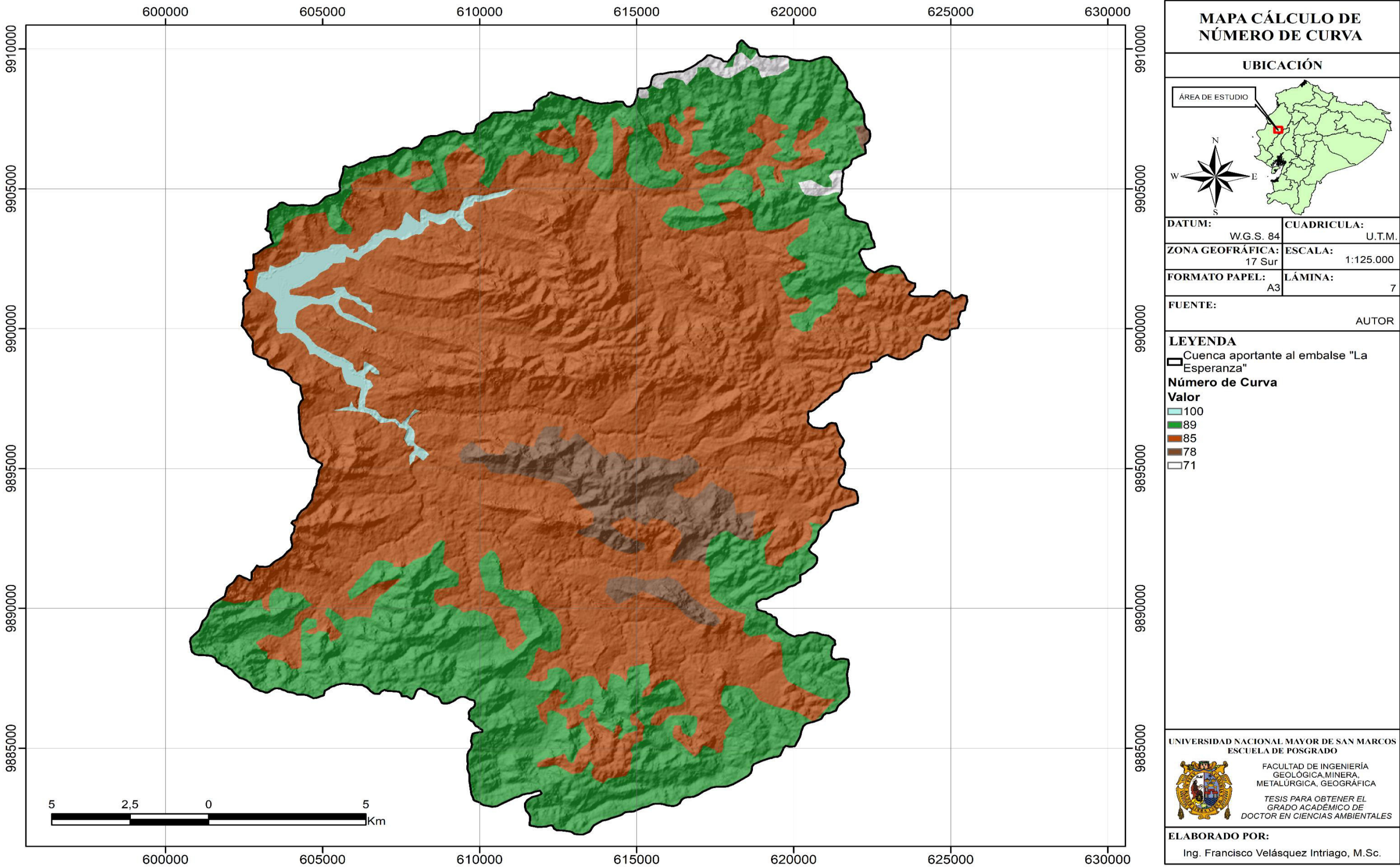
Anexo 4.5. Mapas de áreas aportantes: Estación Calceta – Presa La Esperanza



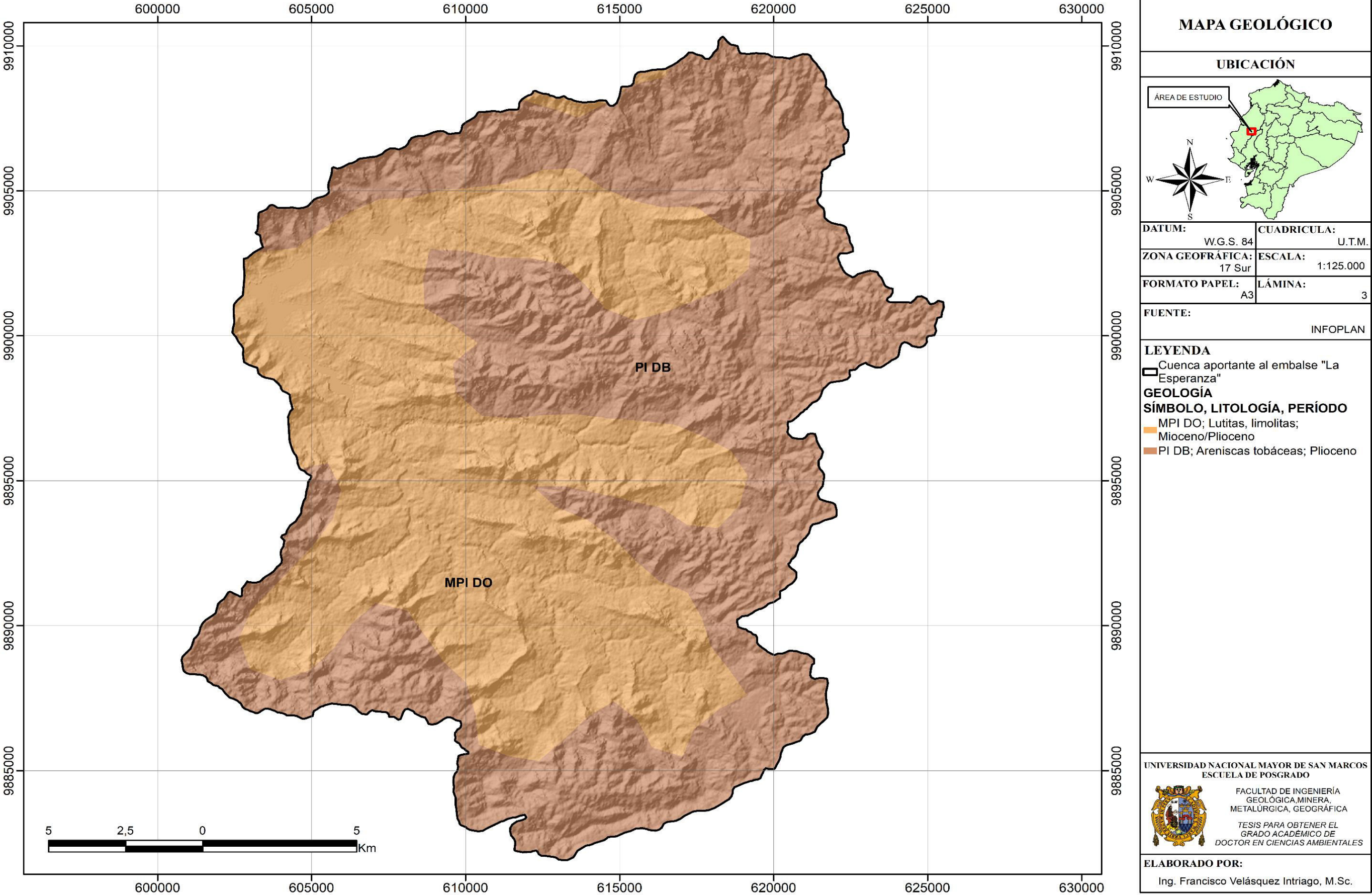
Anexo 4.6. Mapa de estaciones meteorológicas, en radio periférico de 50 Km



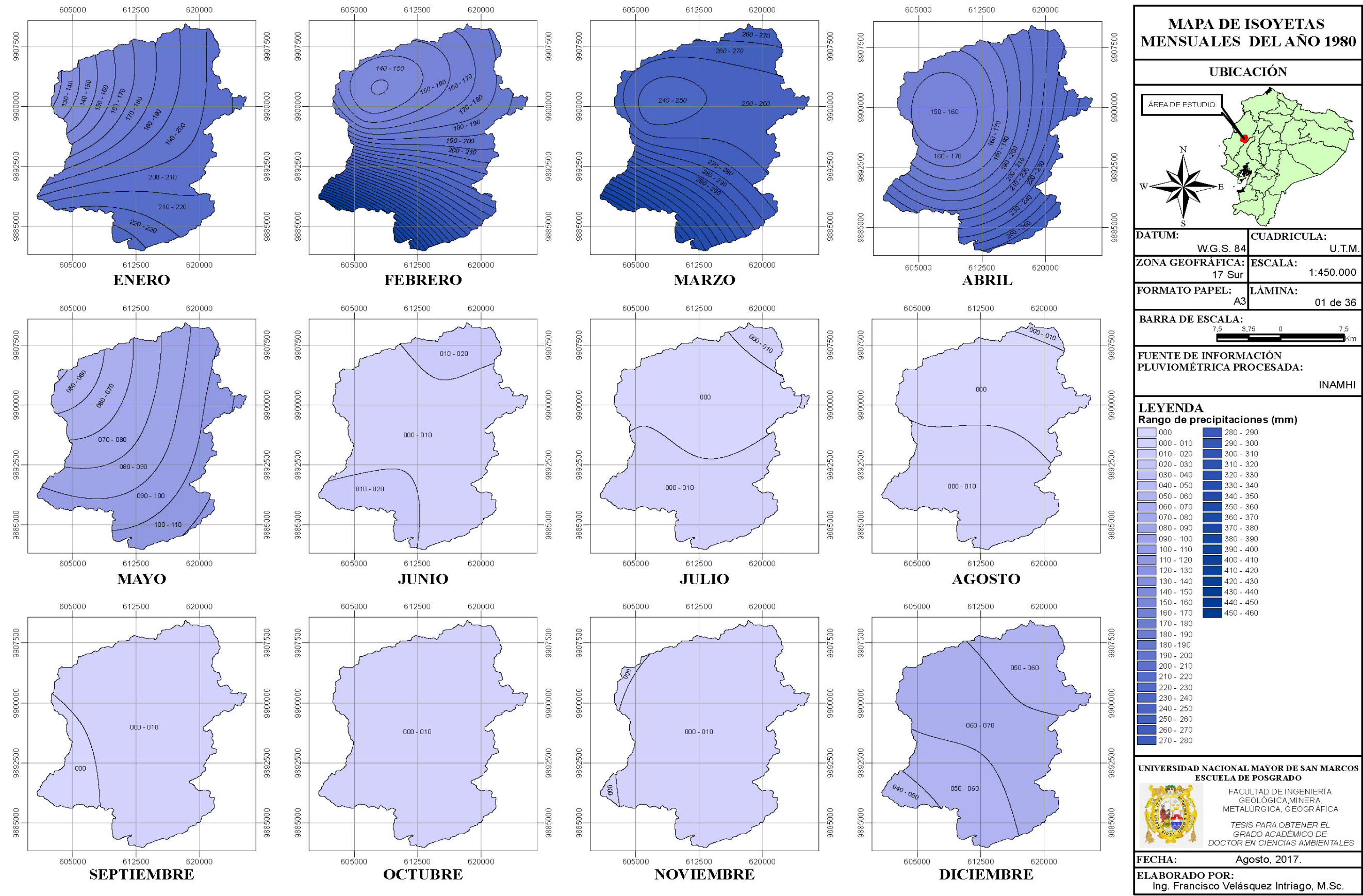
Anexo 4.7. Mapa de número de curva

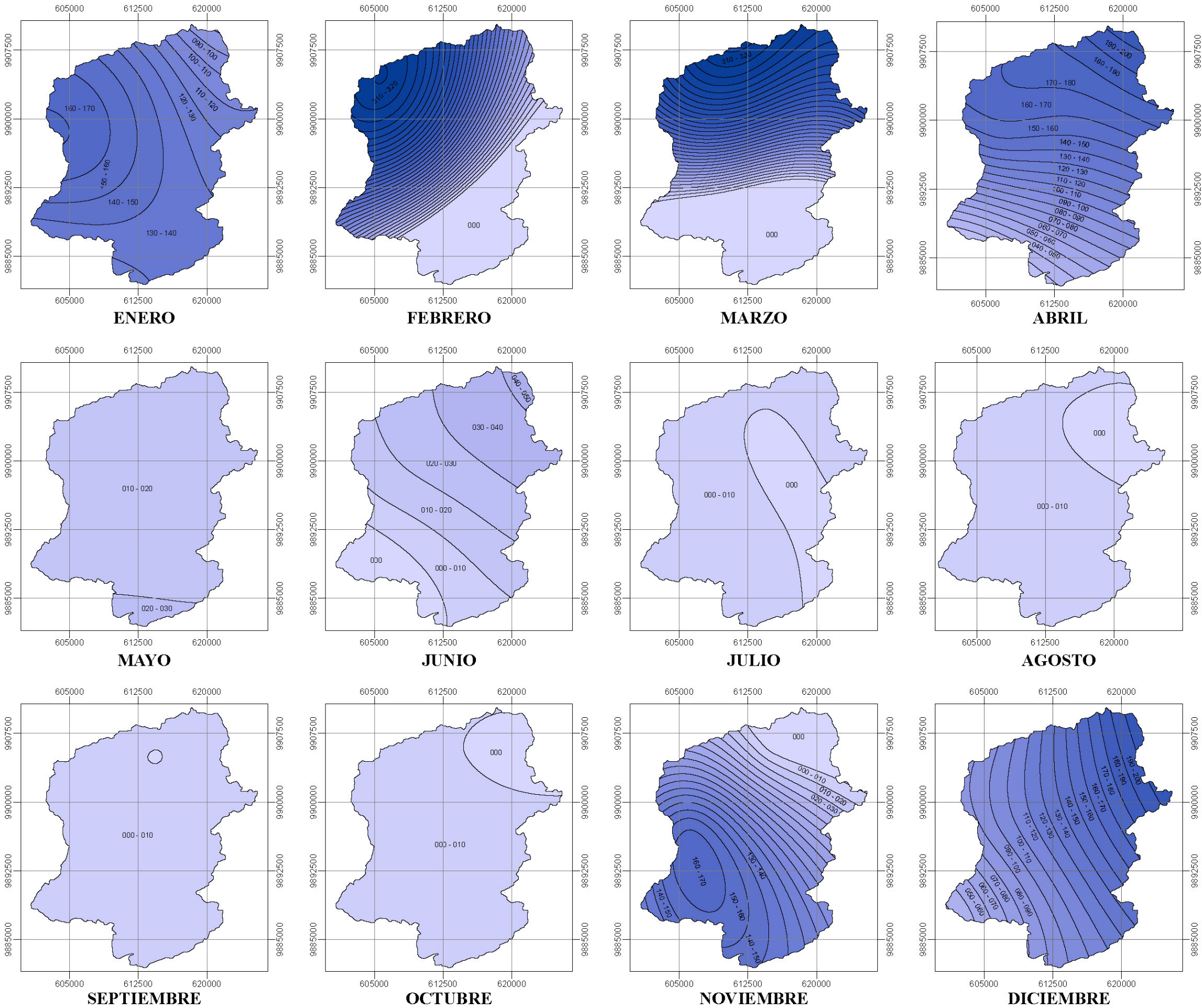


Anexo 4.8. Mapa geológico



Anexo 4.9. Mapas de isoyetas mensuales





MAPA DE ISOYETAS MENSUALES DEL AÑO 1985

UBICACIÓN

DATUM:	W.G.S. 84	CUADRICULA:	U.T.M.
ZONA GEOGRÁFICA:	17 Sur	ESCALA:	1:450.000
FORMATO PAPEL:	A3	LÁMINA:	06 de 36

BARRA DE ESCALA:

FUENTE DE INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA PROCESADA:

INAMHI

LEYENDA

Rango de precipitaciones (mm)

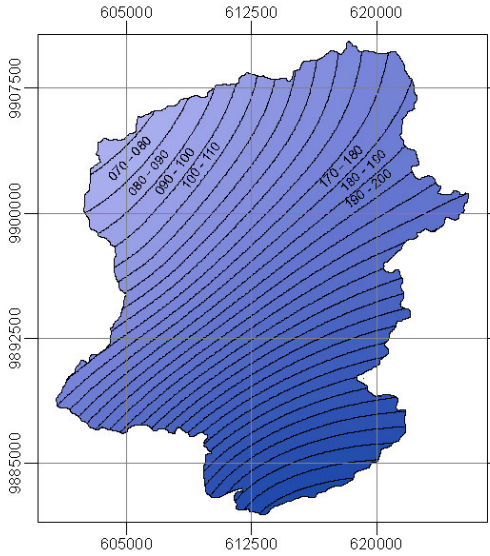
000	300 - 310
000 - 010	310 - 320
010 - 020	320 - 330
020 - 030	
030 - 040	
040 - 050	
050 - 060	
060 - 070	
070 - 080	
080 - 090	
090 - 100	
100 - 110	
110 - 120	
120 - 130	
130 - 140	
140 - 150	
150 - 160	
160 - 170	
170 - 180	
180 - 190	
190 - 200	
200 - 210	
210 - 220	
220 - 230	
230 - 240	
240 - 250	
250 - 260	
260 - 270	
270 - 280	
280 - 290	
290 - 300	

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
ESCUELA DE POSGRADO

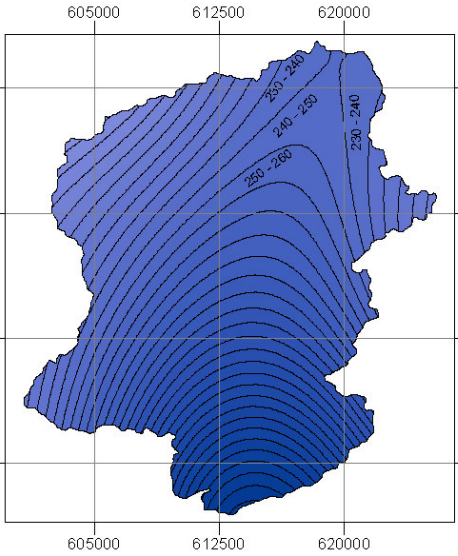
FACULTAD DE INGENIERÍA
GEOLÓGICA MINERA,
METALÚRGICA, GEOGRÁFICA

TESIS PARA OBTENER EL
GRADO ACADÉMICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

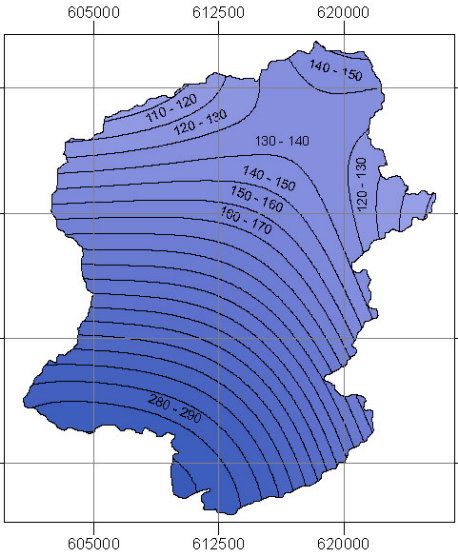
FECHA:	Agosto, 2017.
ELABORADO POR:	Ing. Francisco Velásquez Intriago, M.Sc.



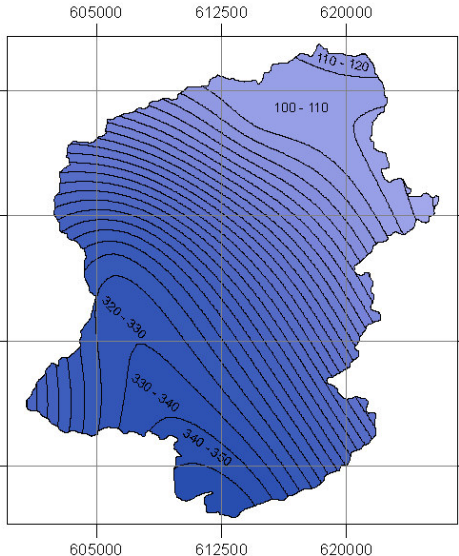
ENERO



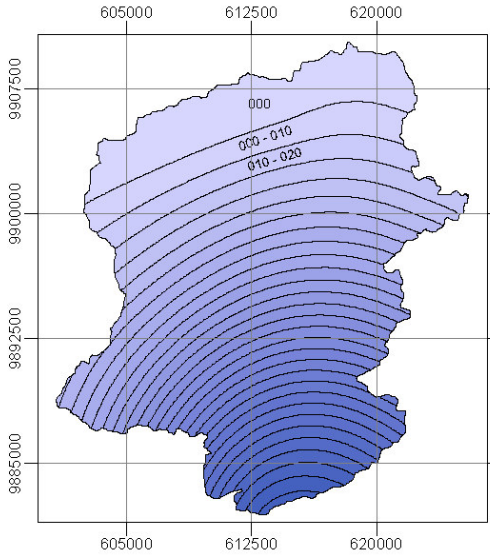
FEBRERO



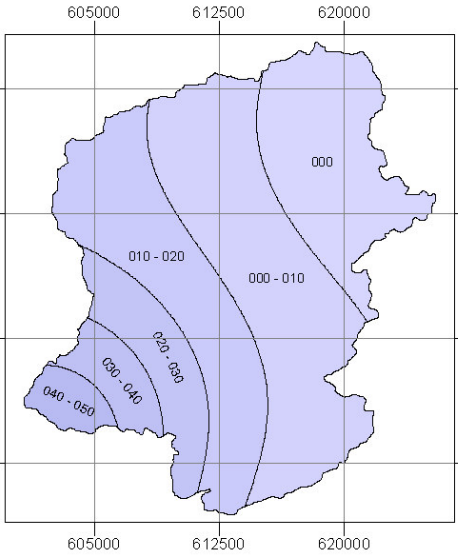
MARZO



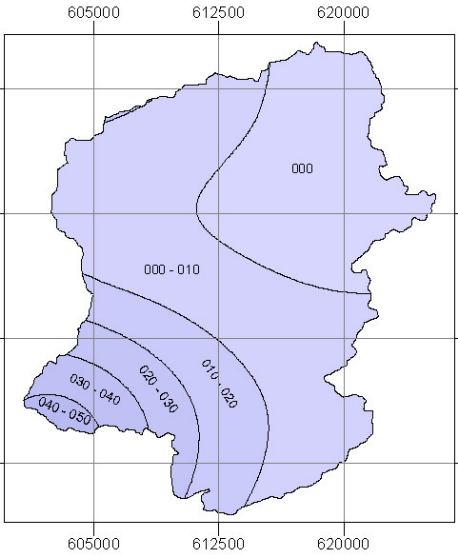
ABRIL



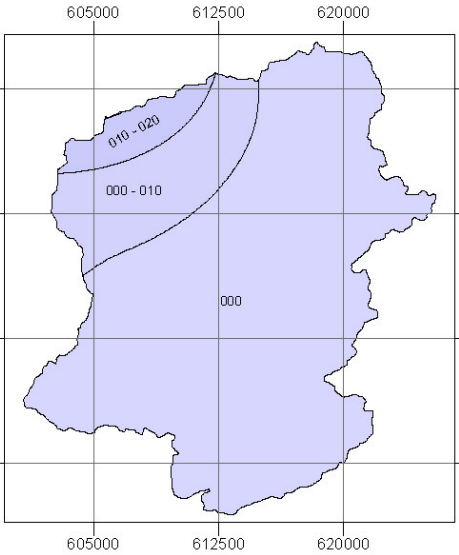
MAYO



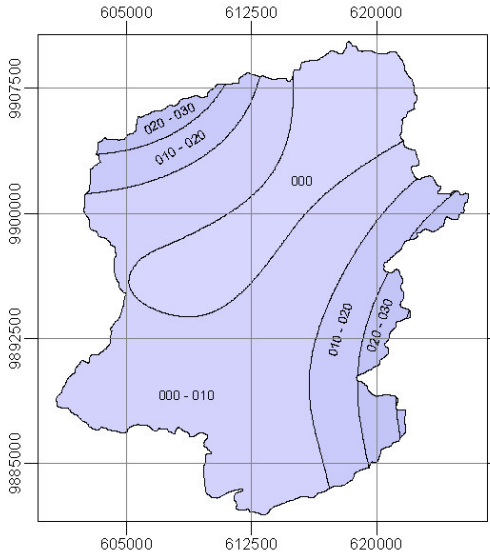
JUNIO



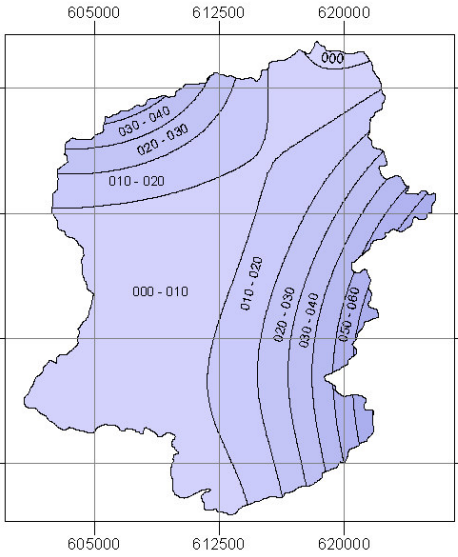
JULIO



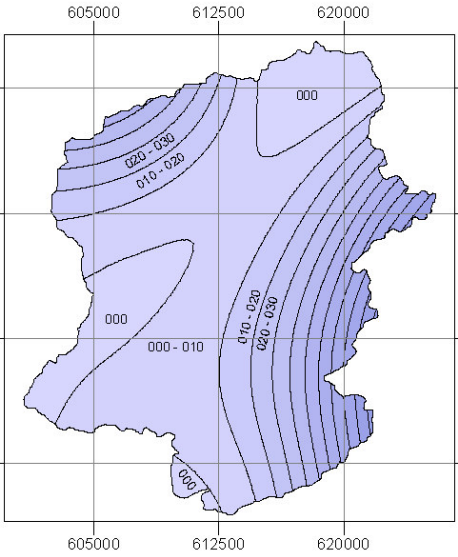
AGOSTO



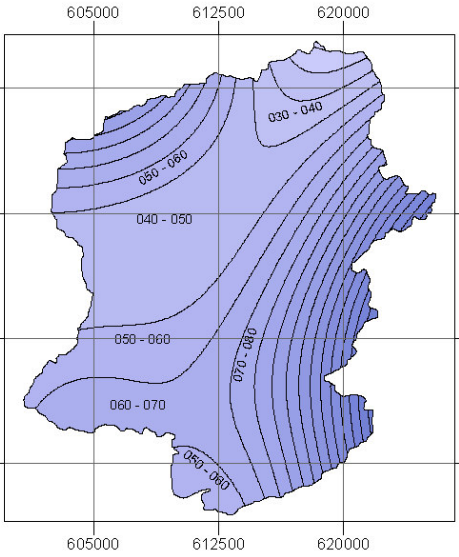
SEPTIEMBRE



OCTUBRE



NOVIEMBRE



DICIEMBRE

MAPA DE ISOYETAS MENSUALES DEL AÑO1990

UBICACIÓN

ÁREA DE ESTUDIO

N

W

E

S

DATUM:	W.G.S. 84	CUADRICULA:	U.T.M.
ZONA GEOGRÁFICA:	17 Sur	ESCALA:	1:450.000
FORMATO PAPEL:	A3	LÁMINA:	11 de 36

BARRA DE ESCALA:

7,5

3,75

0

7,5

km

FUENTE DE INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA PROCESADA:

INAMHI

LEYENDA

Rango de precipitaciones (mm)

000	300 - 310
000 - 010	310 - 320
010 - 020	320 - 330
020 - 030	330 - 340
030 - 040	340 - 350
040 - 050	350 - 360
050 - 060	360 - 370
060 - 070	370 - 380
070 - 080	380 - 390
080 - 090	390 - 400
090 - 100	400 - 410
100 - 110	410 - 420
110 - 120	420 - 430
120 - 130	430 - 440
130 - 140	440 - 450
140 - 150	450 - 460
150 - 160	460 - 470
160 - 170	470 - 480
170 - 180	480 - 490
180 - 190	
190 - 200	
200 - 210	
210 - 220	
220 - 230	
230 - 240	
240 - 250	
250 - 260	
260 - 270	
270 - 280	
280 - 290	
290 - 300	

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS ESCUELA DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA, GEOGRÁFICA

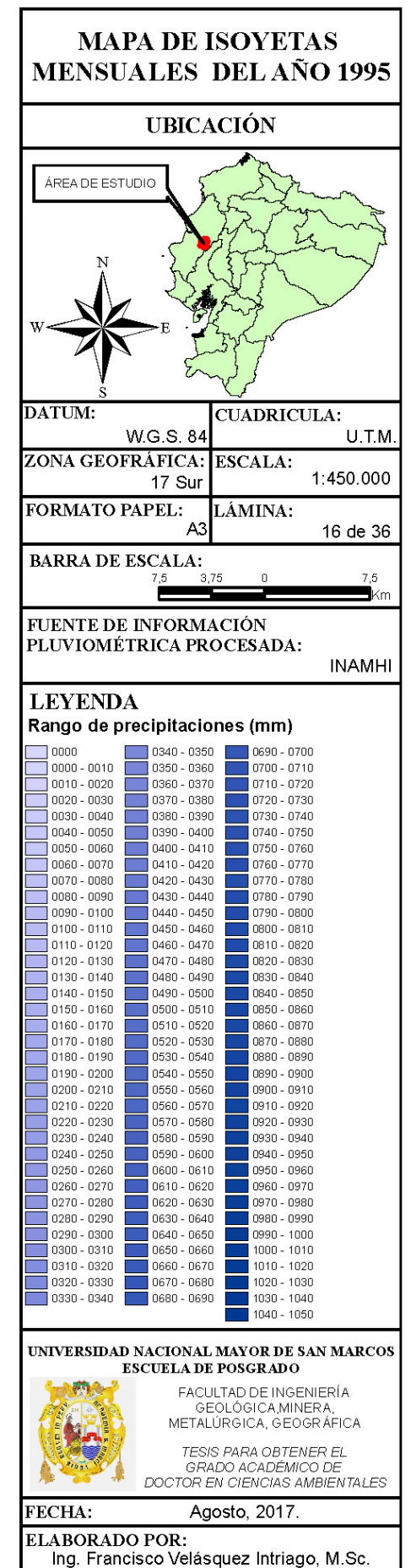
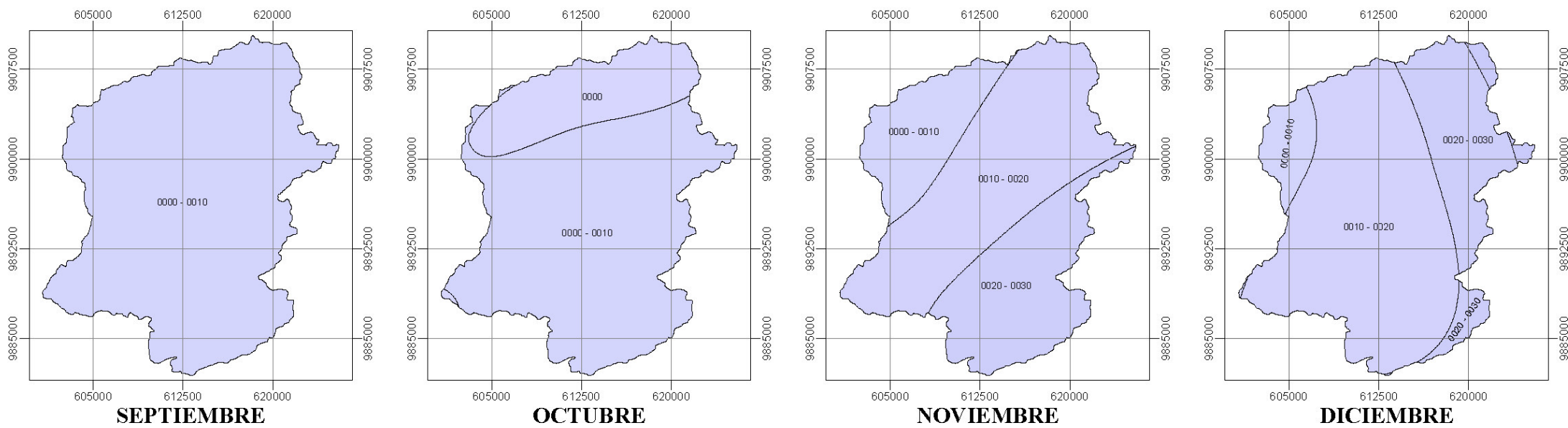
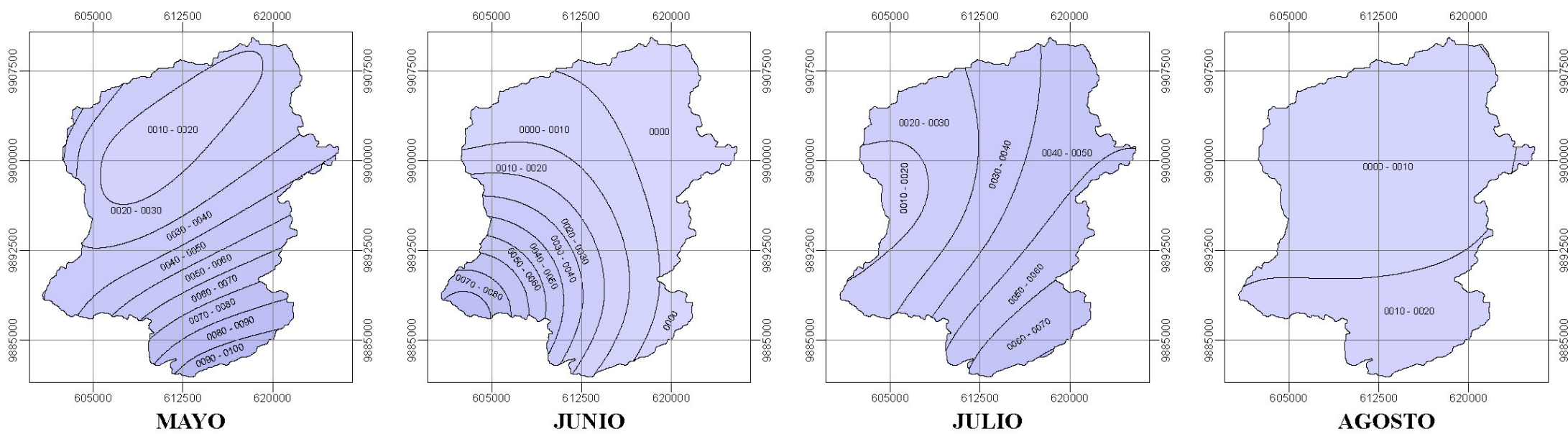
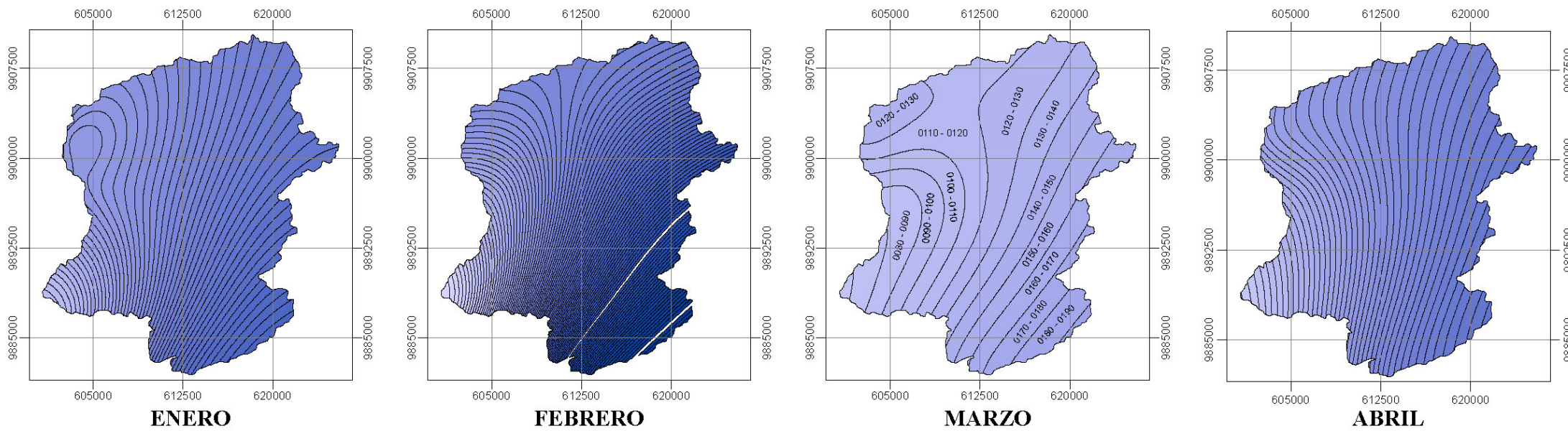
TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

FECHA:

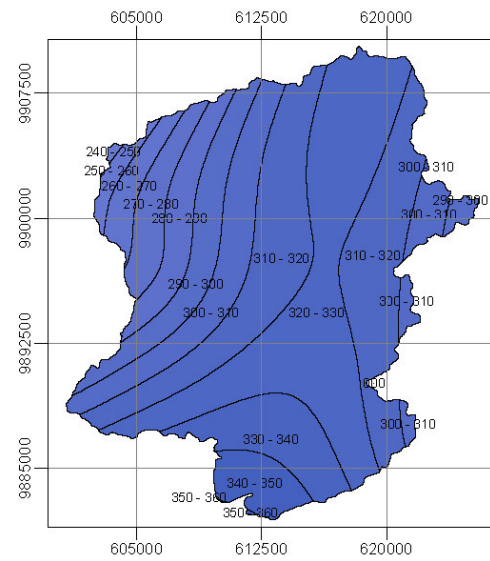
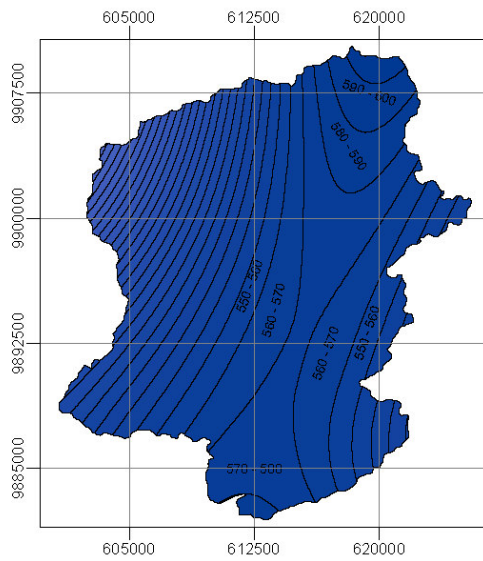
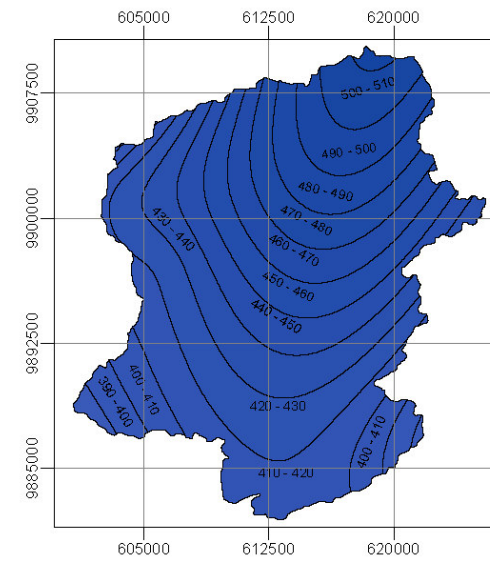
Agosto, 2017.

ELABORADO POR:

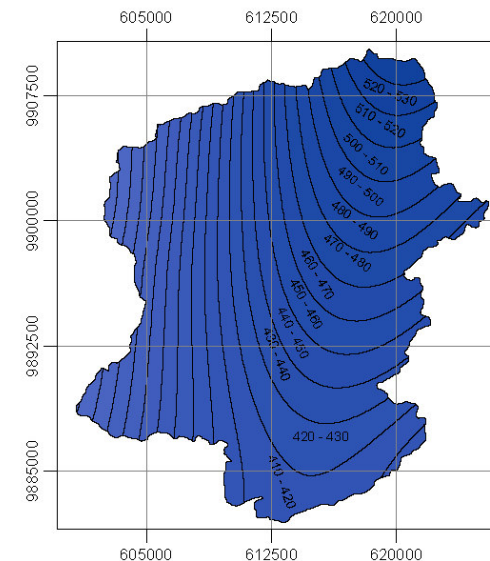
Ing. Francisco Velásquez Intriago, M.Sc.



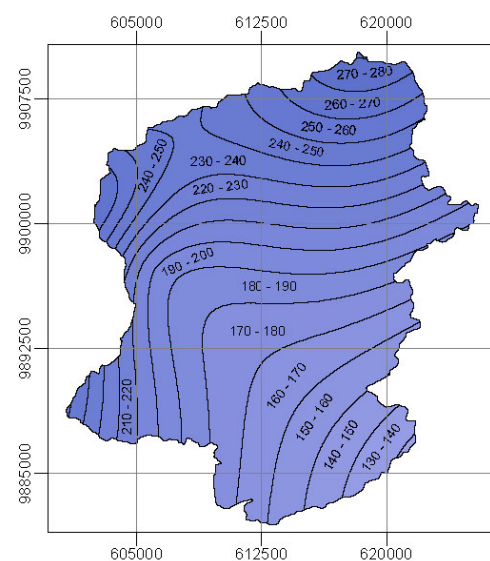


**ENERO****FEBRERO**

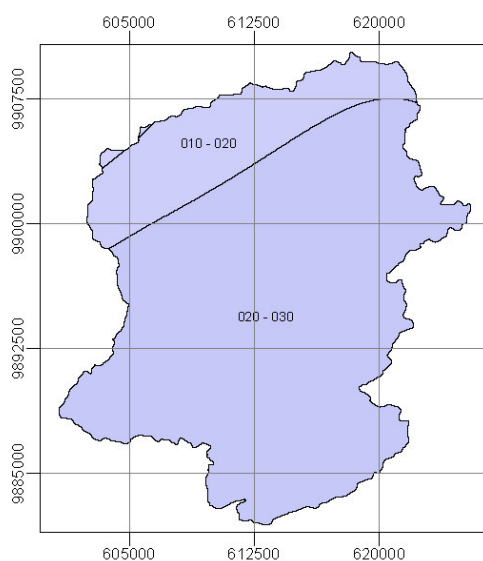
MARZO



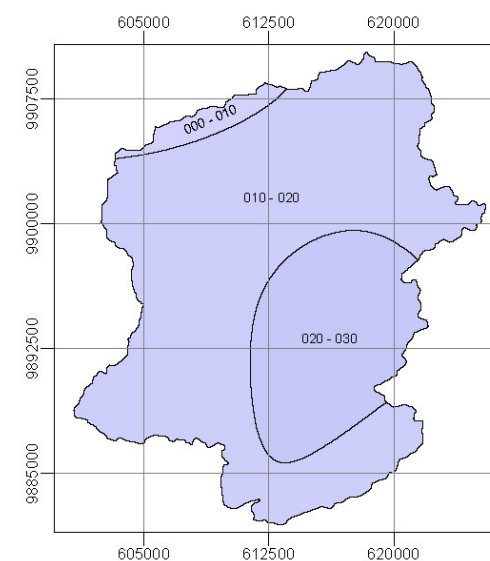
ABRIL



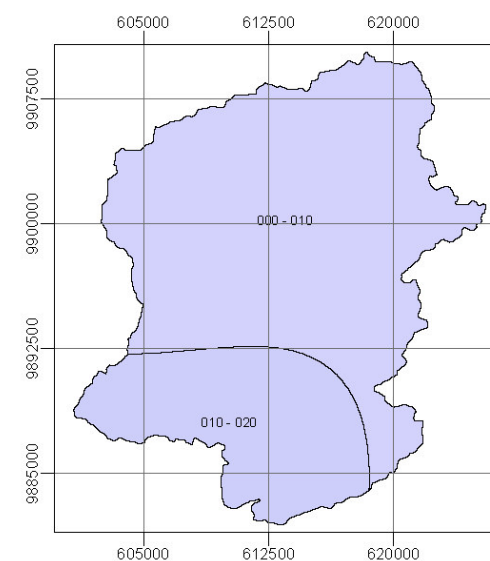
MAYO



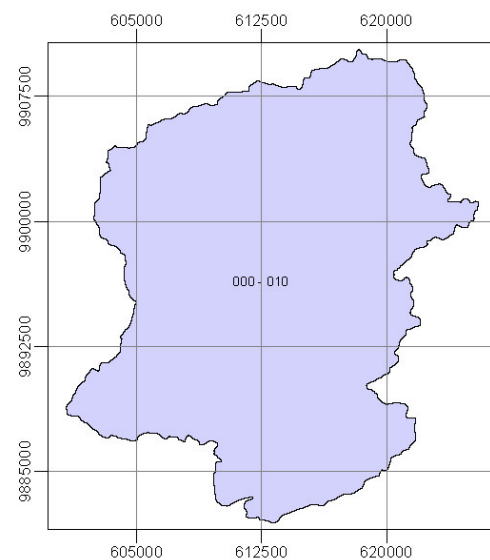
JUNIO



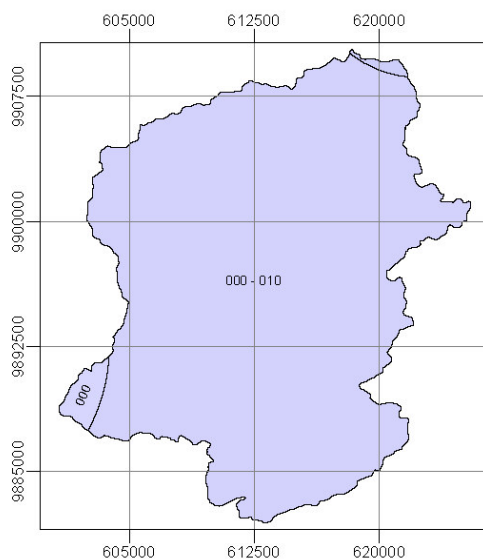
JULIO



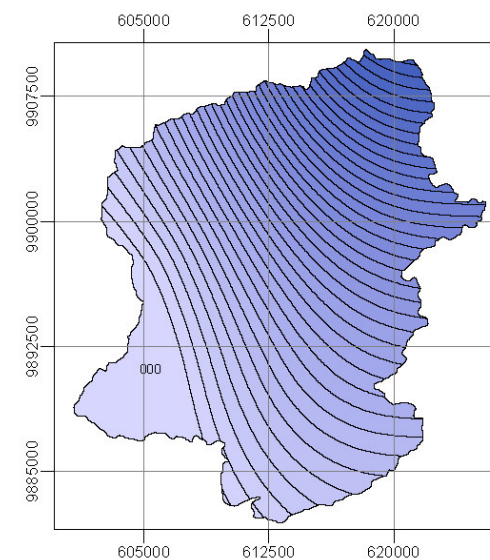
AGOSTO



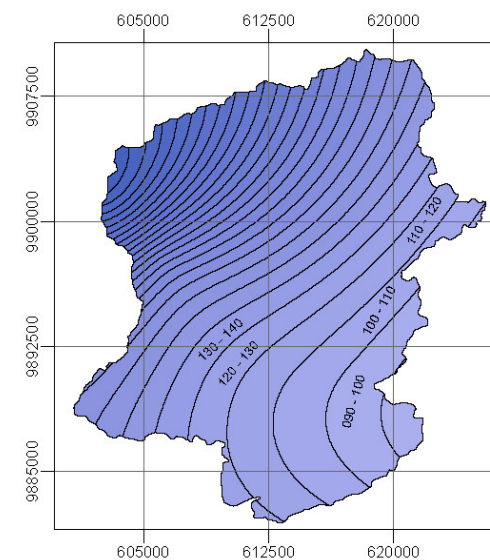
SEPTIEMBRE



OCTUBRE



NOVEMBRE



DICIEMBRE

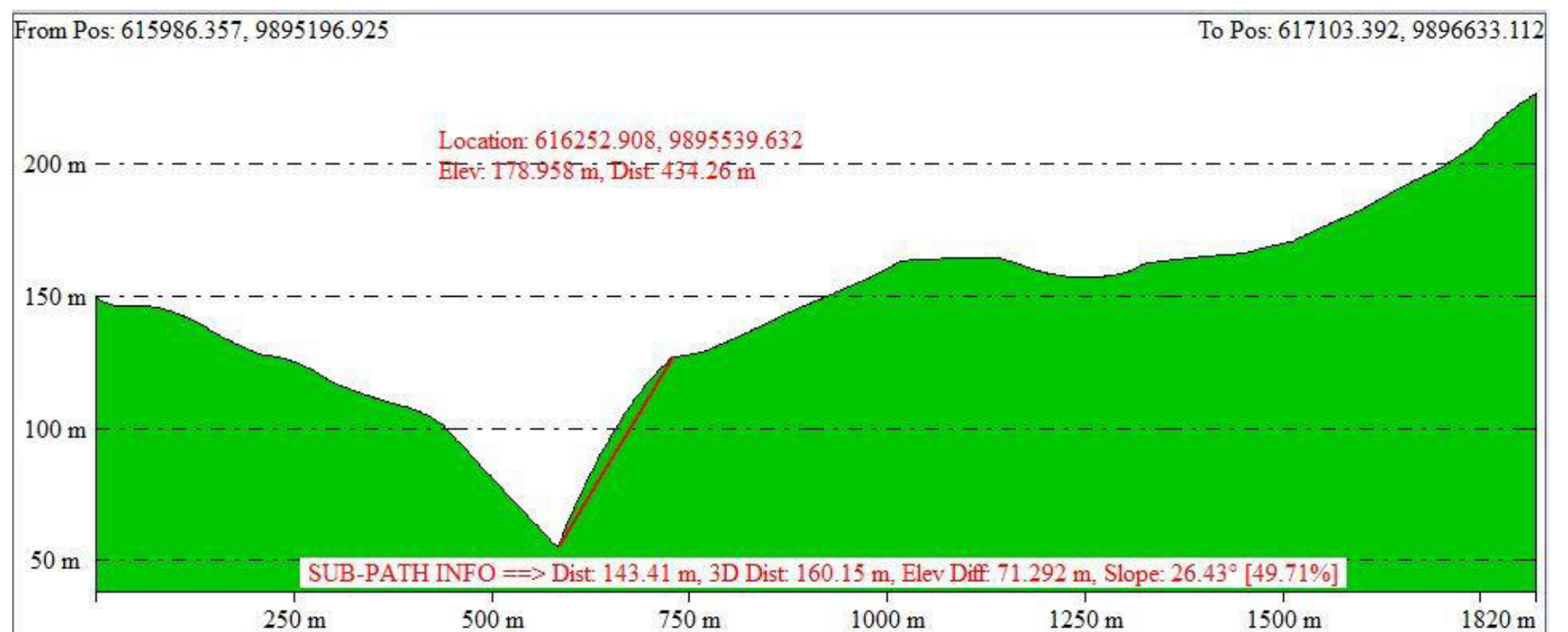
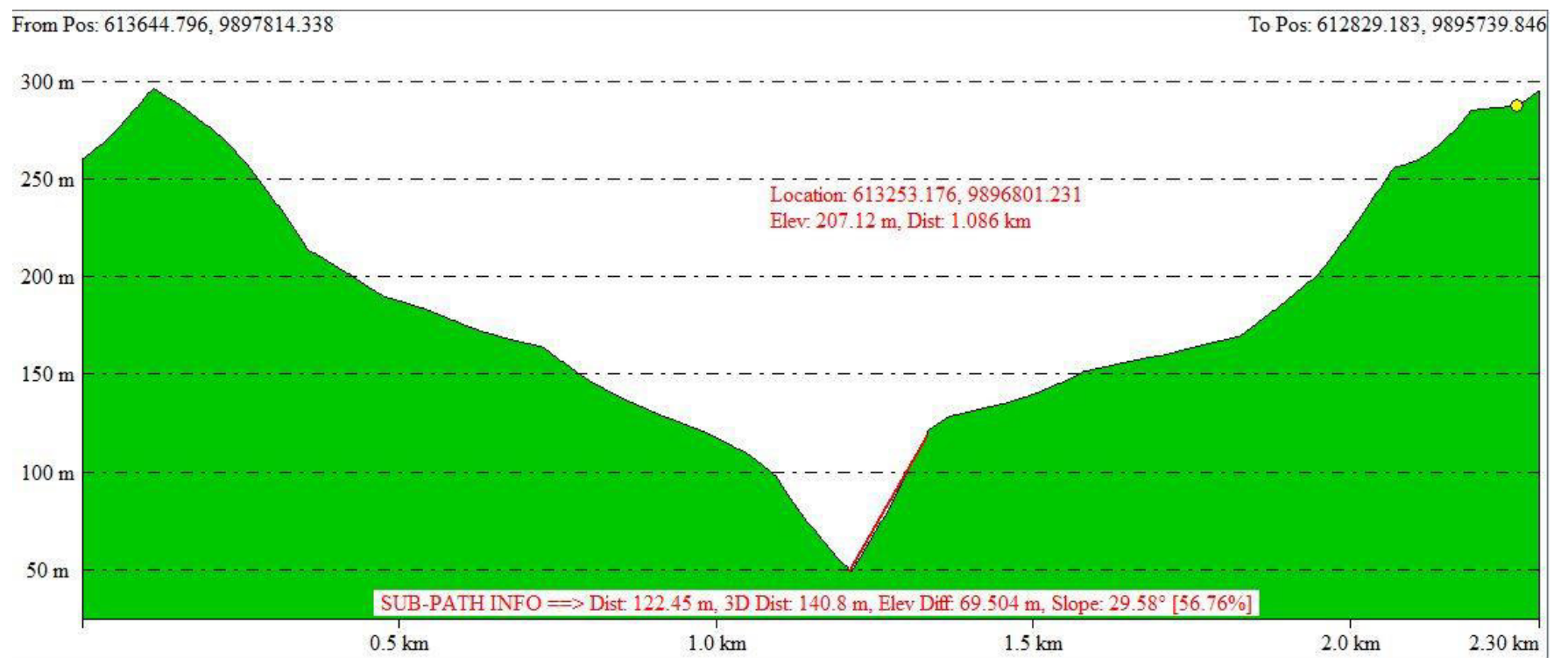
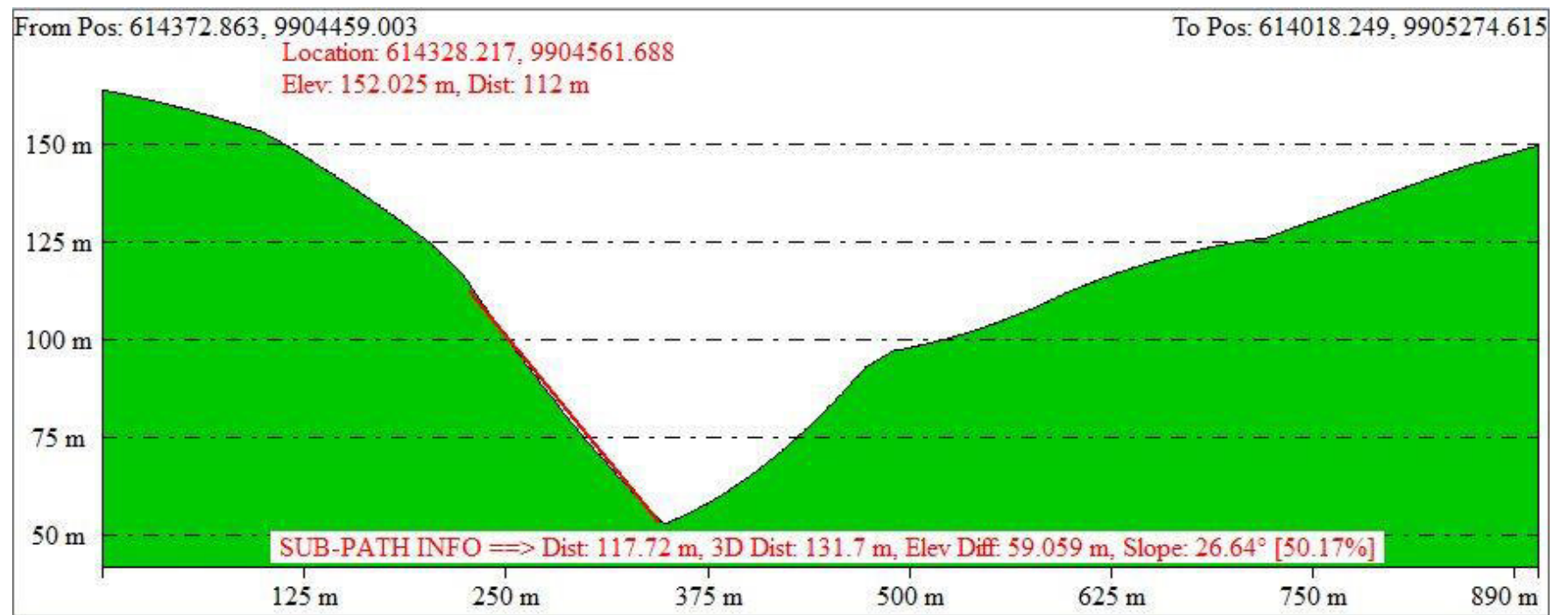


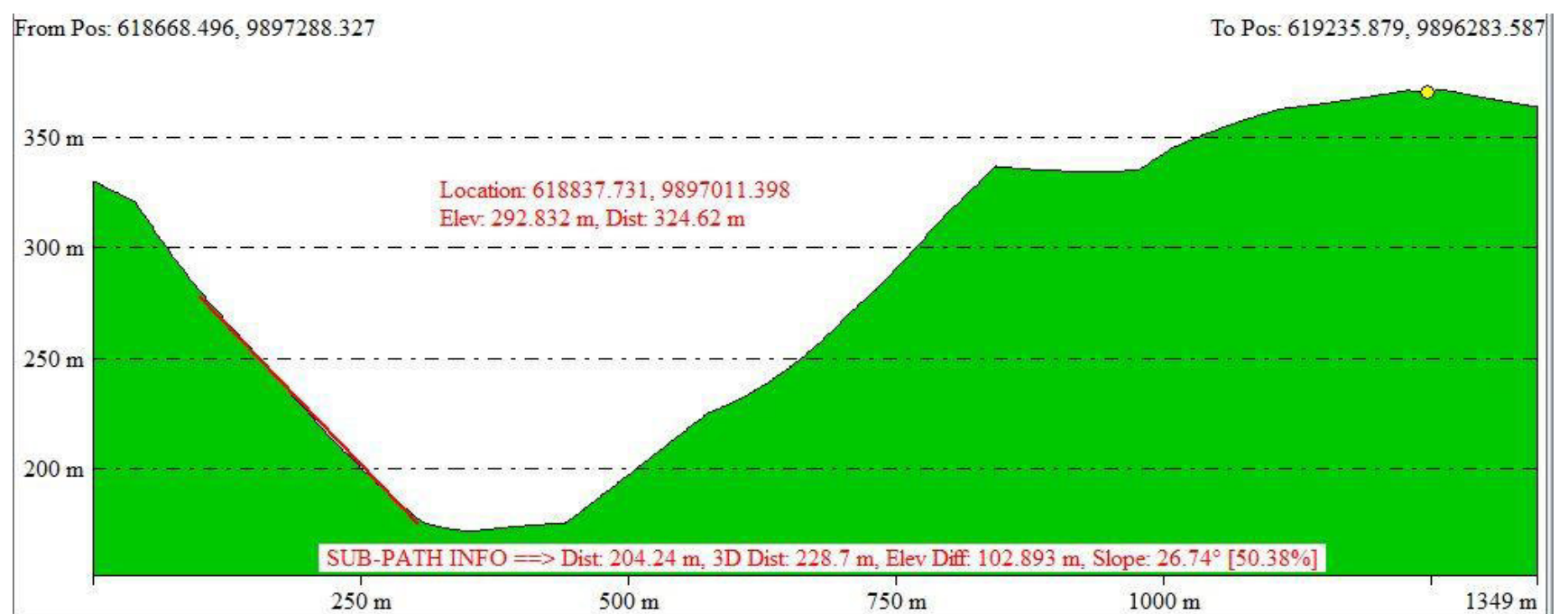
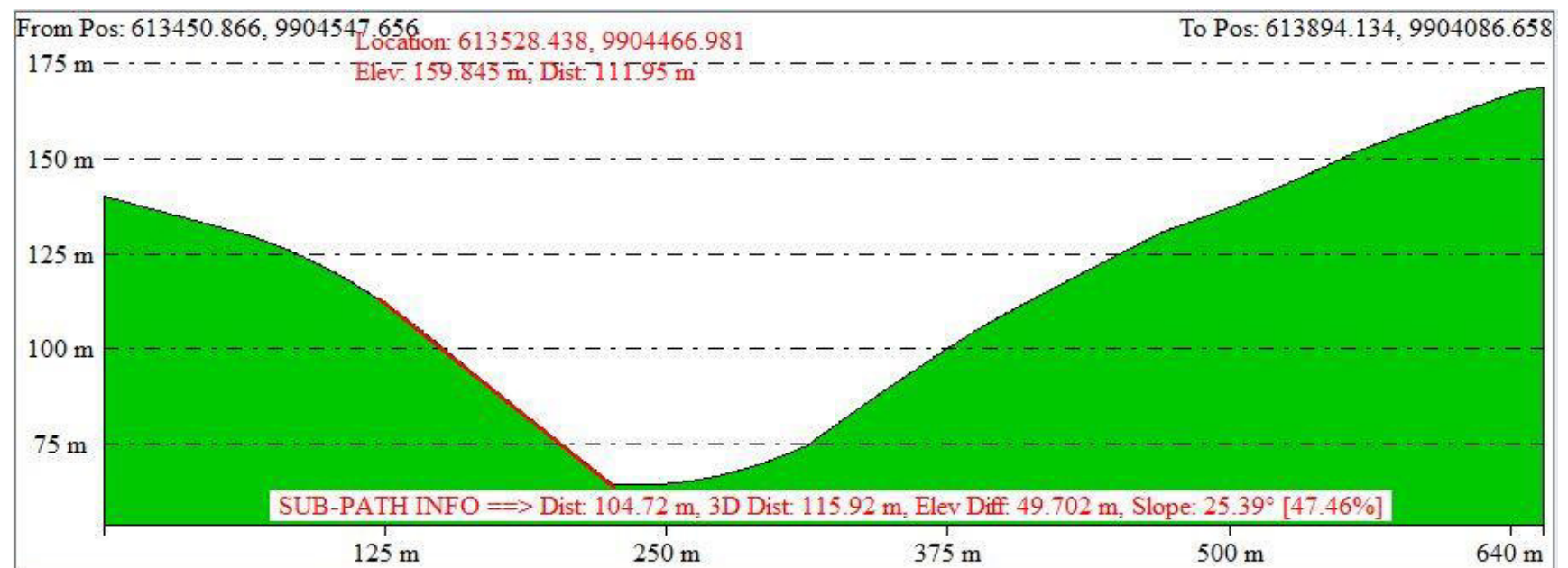
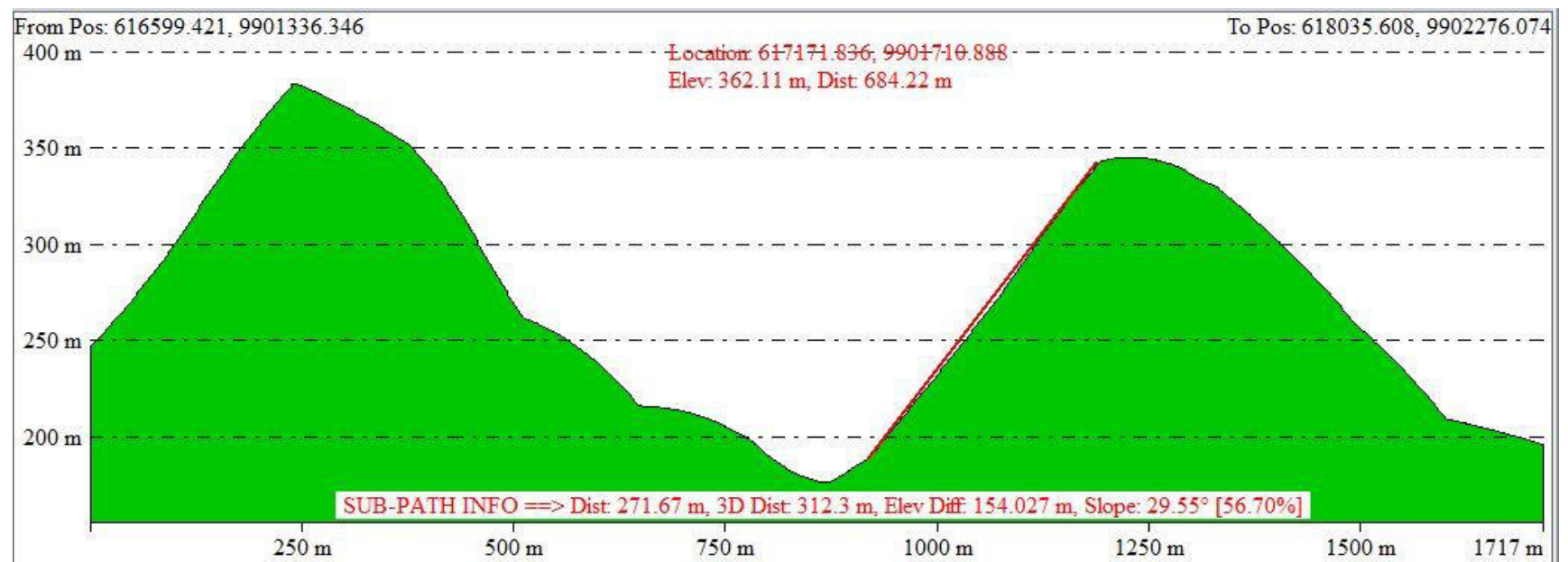
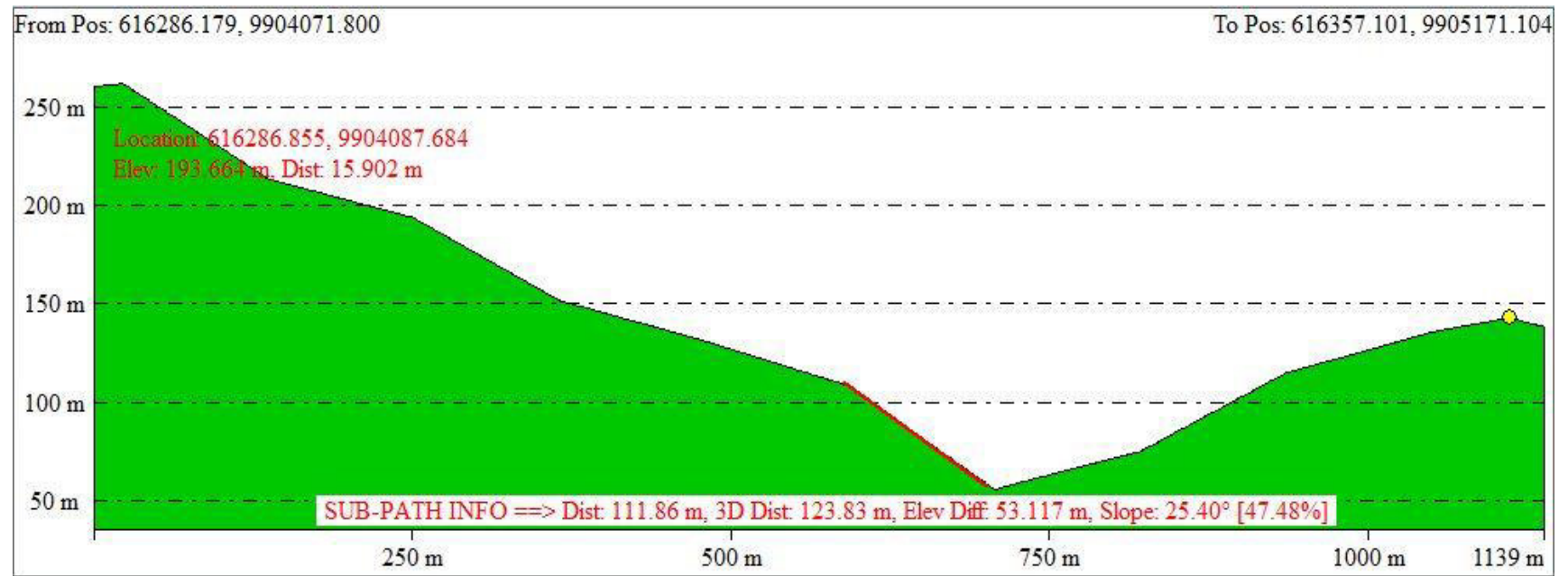
FECHA:	Agosto, 2017.
ELABORADO POR:	Ing. Francisco Velásquez Intriago, M.Sc.

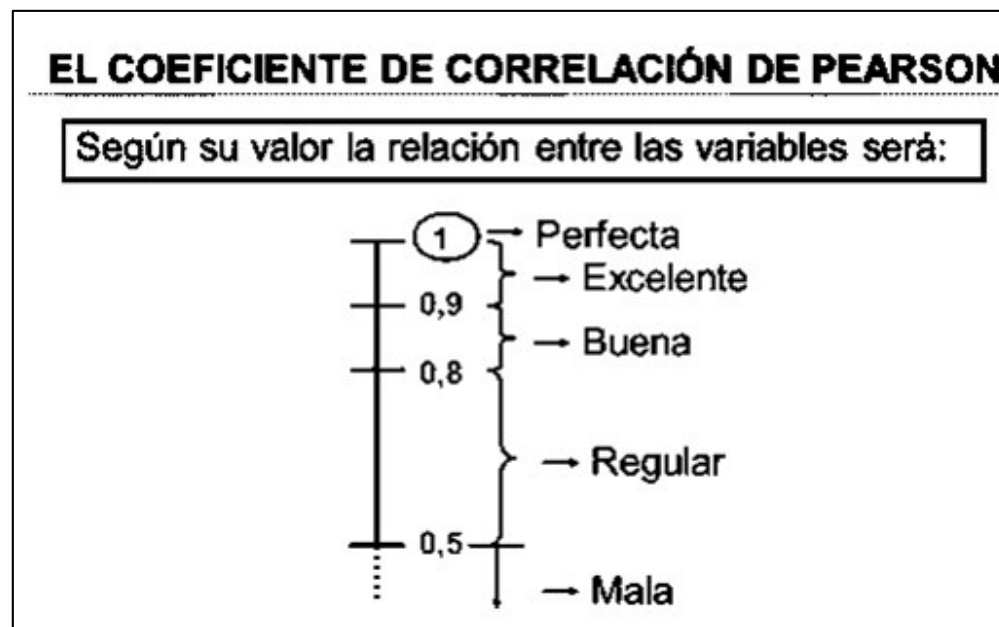
Anexo 5. Precipitaciones medias mensual del periodo 1980 - 2017

AÑO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1980	188,16	220,56	277,42	200,88	87,74	9,63	0,11	0,52	0,16	2,46	13,32	57,91
1981	130,19	529,49	318,13	266,96	1,80	4,86	22,54	3,11	2,86	2,13	5,28	28,60
1982	190,83	131,47	30,94	129,69	28,95	17,35	0,00	13,52	43,16	196,05	377,12	378,13
1983	592,76	653,34	437,32	244,35	594,88	386,71	22,83	73,81	151,25	6,04	34,23	59,92
1984	22,97	483,05	427,20	268,22	53,40	15,55	3,55	0,87	8,25	0,22	3,46	172,51
1985	138,39	103,69	121,55	125,77	16,83	17,37	1,09	1,11	3,41	3,50	88,05	121,57
1986	393,67	222,63	145,43	316,44	53,21	14,17	1,66	4,20	2,49	24,50	23,72	24,28
1987	378,46	500,79	414,12	199,32	80,28	9,72	34,66	36,66	10,03	8,53	43,05	53,77
1988	296,89	505,10	117,48	209,01	180,83	11,37	20,59	5,72	11,72	12,82	21,80	81,77
1989	603,21	462,12	266,31	443,96	46,96	41,30	8,56	2,00	35,24	19,99	3,78	47,59
1990	203,38	277,32	183,57	220,13	82,92	11,16	8,21	1,36	5,97	19,83	24,49	65,74
1991	188,00	409,76	336,03	187,09	106,79	7,91	3,93	4,51	1,18	1,67	35,42	74,84
1992	542,07	623,59	870,55	579,69	629,46	60,97	20,12	2,51	2,77	2,24	1,38	39,30
1993	206,72	741,10	185,40	216,70	27,37	21,94	24,50	1,93	6,86	8,11	7,25	37,54
1994	350,12	322,02	359,85	345,68	136,13	47,63	1,22	1,29	1,61	18,46	2,11	259,71
1995	364,84	474,51	129,71	303,11	40,30	15,75	39,46	8,11	0,49	1,13	16,07	21,11
1996	150,66	383,11	947,29	134,85	0,76	5,87	8,04	2,25	0,05	2,60	6,45	51,63
1997	243,55	520,40	472,70	660,87	409,92	460,83	215,09	255,10	360,69	244,47	659,91	591,15
1998	563,42	551,99	641,60	969,11	433,71	259,45	105,34	103,12	154,53	243,60	388,35	466,13
1999	197,69	667,44	488,31	394,19	137,01	279,97	9,51	3,16	88,91	7,96	75,99	65,49
2000	82,91	510,89	250,66	341,28	110,11	35,21	2,95	3,86	6,76	2,45	3,49	36,16
2001	561,20	486,09	513,35	445,02	78,53	2,20	0,29	4,27	1,29	2,48	5,95	14,33
2002	21,98	743,90	21,98	546,76	186,69	27,71	23,98	8,95	5,61	23,77	32,21	177,34
2003	224,39	381,08	148,49	124,34	101,29	11,23	19,87	7,52	12,33	15,60	50,48	59,10
2004	95,94	171,33	273,47	105,83	101,08	31,34	7,16	2,29	17,88	22,46	2,18	28,07
2005	148,81	335,22	221,16	442,85	8,39	2,53	2,72	0,88	2,37	5,47	3,49	77,68
2006	147,83	465,91	306,16	53,76	25,22	24,80	2,81	13,84	17,79	2,32	27,70	17,30
2007	197,60	250,89	327,62	290,41	71,73	26,69	6,94	5,22	0,60	9,07	6,40	52,08
2008	199,44	199,44	233,37	76,18	13,49	11,79	3,25	7,93	5,39	8,03	6,33	4,88
2009	350,88	320,23	86,11	17,77	27,80	6,60	0,92	37,11	0,40	2,06	0,40	31,64
2010	308,17	528,55	429,08	421,82	206,78	23,75	18,46	8,46	4,51	3,48	108,87	165,70
2011	223,36	296,90	10,38	321,67	44,81	32,64	30,70	2,78	0,05	8,06	0,02	73,04
2012	535,82	680,77	663,84	263,06	231,74	108,00	1,38	263,06	2,04	4,89	18,62	41,63
2013	158,18	207,04	182,54	87,85	27,13	11,35	3,38	1,55	5,69	12,59	14,50	30,00
2014	428,35	324,73	203,06	141,61	175,86	58,54	8,43	4,54	10,98	30,92	4,09	5,59
2015	237,13	262,38	394,03	200,26	550,24	33,60	79,65	6,42	1,85	19,24	20,65	236,09
2016	384,75	273,18	306,11	243,60	91,14	42,26	2,04	0,23	10,39	0,45	3,01	7,94
2017	157,59	412,40	438,03	239,67	159,01	45,41	0,58	4,86	1,01	16,23	0,99	23,98
Promedio	273,96	411,43	320,54	283,68	141,06	58,82	20,17	23,91	26,28	26,73	56,33	99,51
Mínimo	21,98	103,69	10,38	17,77	0,76	2,20	0,00	0,23	0,05	0,22	0,02	4,88
Máximo	603,21	743,90	947,29	969,11	629,46	460,83	215,09	263,06	360,69	244,47	659,91	591,15
Mediana	215,04	411,08	291,77	243,98	85,33	22,84	7,60	4,39	5,50	8,04	13,91	52,93

Anexo 6. Perfiles topográficos de pendientes pronunciadas de la cuenca aportante del embalse La Esperanza





Anexo 7. Ponderación cualitativa de Pearson entre relación de las variables.

Fuente: Ruiz, M. 2007 *Estadística Básica*.